



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Naval y Oceánica

Departamento de Ingeniería de Materiales y Fabricación

Proyecto Final de Carrera

***Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un
sumergible independiente mediante el reglamento de
clasificación del Germanischer Lloyd***

DIRECTOR: Dr. Juan José Hernández Ortega

CODIRECTOR: D. Federico López-Cerón de Lara

AUTOR: David González Rubio



“Sumergible”

Vehículo subacuático tripulado no militar.

- Sumergibles autónomos:* Son aquellos vehículos que durante la misión no están conectados físicamente al buque de apoyo (por ejemplo, mediante un cordón umbilical).
- Sumergibles no autónomos:* Son aquellos vehículos que durante la misión siempre están conectados físicamente al buque de apoyo (por ejemplo, mediante un cordón umbilical).
- Sumergibles Independientes:* Son aquellos vehículos capaces de desarrollar su misión en alta mar sin barco de apoyo.

Por Germanischer Lloyd

TABLA DE CONTENIDOS

	<p align="center">Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL</p>	
---	--	---



1.	Siglas y Abreviaturas	1
2.	Introducción	3
3.	Historia submarina	5
4.	Objetivo	14
5.	Generalidades	16
6.	Formas del casco	21
6.1	Introducción.....	22
6.2	Dimensiones generales.....	23
6.3	Parte central.....	24
6.4	Forma de proa.....	24
6.5	Forma de popa.....	24
6.6	Forma de la superestructura	25
6.7	Forma de la vela	26
6.8	Penetraciones del casco	26
6.9	Plano de formas del casco exterior	27
7.	Estructura	29
7.1	Introducción.....	30
7.2	Forro	30
7.3	Cuadernas.....	31
7.4	Mamparos resistentes	32
7.5	Bulárcama	32
7.6	Modos de fallo.....	33
7.6.1	Fallo por inestabilidad de las cuadernas	33
7.6.2	Fallo por plastificación del forro	35
7.6.3	Fallo por inestabilidad del forro entre cuadernas.....	36
7.6.4	Fallo por inestabilidad general.....	37
7.7	Plano del casco resistente	39
8.	Introducción al cálculo	41
8.1	Introducción.....	42
8.2	Datos fijos del proceso de cálculo.....	43
8.2.1	Material.....	43
8.2.2	Geometría de la estructura	44
8.2.3	Tolerancias constructivas	45
8.2.4	Coefficiente (S_2) de la presión de colapso.....	47



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



8.2.5	Adición de espesor por corrosión (t_k)	48
8.2.6	Constantes físicas	48
8.3	Incertidumbres del proceso de cálculo	49
8.4	Plano de la estructura en 3D del casco resistente	50
8.5	Comparativa de aceros	51
9.	Cálculo (Resultados)	56
9.1	Introducción.....	57
9.2	F1 - Stresses in a uniformly stiffened cylinder or cone as basis for the calculation of the collapse pressure	58
9.3	F2 - Collapse pressure for the asymmetric interstiffener buckling of the shell in uniformly stiffened sections of the pressure hull	61
9.4	F3 - Collapse pressure for the symetric interstiffener buckling of the shell in uniformly stiffened sections of the pressure hull.....	63
9.5	F4 - Collapse pressure for the general instability under consideration of the deep frame	65
9.6	F5 - Collapse pressure for tripping of frames	69
9.7	F6 – Spherical shells and dished ends.....	73
9.8	F7 - Penetration of the pressure hull and discontinuities.....	74
9.9	Acrylic windows.....	76
9.10	Resumen de resultados	78
10.	Estrategia constructiva	81
10.1	Introducción.....	82
10.2	Conceptos básicos de la construcción integrada	83
10.3	Definición de los bloques	84
10.4	Nivel 1. Fabricación de previas simples.	87
10.5	Nivel 2. Fabricación de previas complejas.	93
10.6	Nivel 3. Fabricación de anillos (esloras 1.5-4 metros).....	96
10.7	Nivel 4. Fabricación de bloques (3-4 anillos).....	99
10.8	Nivel 5. Ensamblado de bloques y secciones.	101
11.	Soldadura	103
11.1	Introducción.....	104
11.2	Material de construcción seleccionado.....	105
11.3	Tipos de uniones.....	107
11.4	Cálculo de las uniones soldadas.....	108
11.5	Proceso de soldeo	109
11.6	Soldabilidad, directrices del fabricante	112

	Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL	
---	--	---

11.7 Variables de soldadura y procedimientos de soldeo	115
12. Referencias y bibliografía	124
 ANEXO I – Calculation of the pressure hull	 127
ANEXO II – Acrylic windows	145
ANEXO III – Especificación de material base	153
ANEXO IV – Especificación del aporte y fundente.....	159
ANEXO V – Planos	163

1. SIGLAS Y ABREVIATURAS



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



Los siguientes acrónimos y abreviaturas se han utilizado en este documento.

- A.C.	Antes de Cristo.
- AR	Anillo Resistente.
- AWJC	Abrasive Water Jet Cutting
- B	Manga (m).
- CDD	Cota de Colapso (m) (Collapse Diving Depth).
- CDP	Presión de Colapso (N/mm ²). (Collapse Diving Pressure).
- C eq	Carbono equivalente.
- CO ₂	Dióxido de Carbono.
- CR	Casco Resistente.
- CV	Caballos de Vapor.
- D	Diámetro del Casco Resistente (m).
- E	Módulo elástico de Young (N/mm ²).
- GL	Germanischer Lloyd.
- L	Eslora (m).
- Lcpp	Eslora del Cuerpo de Popa (m).
- Lcpr	Eslora del Cuerpo de Proa (m).
- MEP	Motor Eléctrico Principal.
- MMB	Museo Marítimo de Barcelona.
- NACA	National Advisory Committee for Aeronautics.
- NDD	Cota Nominal de Buceo (m) (Nominal Diving Depth).
- NDP	Presión Nominal de Buceo (N/mm ²) (Nominal Diving Pressure).
- OMI	Organización Marítima Internacional.
- PP	Popa.
- PR	Proa.
- R	Radio del casco resistente (m).
- SAW	Submerged arc welding.
- SSCC	Sociedades de Clasificación.
- TIG	Tungsten Inert Gas.
- tk	Espesor añadido por corrosión (mm).
- V	Voltios.
- v	Coeficiente de Poisson.

2. INTRODUCCIÓN



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



La ambición de desarrollar artefactos submarinos capaces de alcanzar elevadas cotas de inmersión, ha traído consigo la necesidad de investigar todos los fenómenos relacionados con el comportamiento de cascos y estructuras sometidas a presión hidrostática exterior.

Este esfuerzo ha ido acompañado por la aparición progresiva de nuevos materiales, más tenaces y de mejores características mecánicas, lo que ha permitido ir obteniendo artefactos más resistentes y, por tanto, mayores profundidades de inmersión.

El estudio estructural del casco resistente de un submarino es un secreto celosamente guardado por todos los astilleros militares. Tradicionalmente, la construcción de submarinos ha obedecido a imperativos bélicos, lo que ha desencadenado que las grandes potencias navales sean las poseedoras de los conocimientos para realizar los cálculos estructurales de estos buques.

En la actualidad, el empleo de submarino de uso civil (sumergible) se ha visto notablemente incrementado por la necesidad de la explotación de los recursos marinos, tendencia que se va acentuado con el transcurso de los años debido a la expansión industrial y al agotamiento de los recursos y reservas minerales en la parte del globo que emerge.

Como es sabido, las normas de las sociedades de clasificación (SSCC) no tienen por qué ser adoptadas en la construcción de buques militares, por lo que históricamente, éstas no habían desarrollado ninguna normativa respecto a la construcción de este tipo de buques.

La demanda cada vez mayor de sumergibles de exploración, investigación y salvamento, creó la necesidad de normalizar la construcción de los cascos resistentes por parte de las sociedades de clasificación.

Una de las primeras sociedades de clasificación en desarrollar la normativa al respecto, fue la alemana *Germanischer Lloyd* (GL), cuya última versión de la norma y actualmente en vigor es: "Rules for Classification and Construction. I, Ship Technology. Part 5, Underwater Technology. Chapter 2, Manned Submersibles. (Edition 2009)". (Ref. [1]).

La publicación de estas normativas, de acceso y gratuito, nos guía para introducirnos en el estudio del comportamiento de recipientes bajo presión hidrostática y así poder realizar los cálculos correspondientes del casco resistente de un sumergible.

Además se han de cumplir los convenios y códigos internacionales que se enumeran a continuación:

- **ILLC 66** – Convención Internacional sobre Líneas de Carga de 1966, (Ref. [7]).
- **MARPOL 73/78** – Convenio Internacional para la Prevención de la Contaminación por los buques de 1973, incluyendo protocolo de 1978, (Ref. [8]).
- **SOLAS 74** – Convenio internacional para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar de 1974, en su versión modificada, (Ref. [9]).
- **LSA** – Código Internacional de dispositivos de Salvamento expedido por la OMI, (Ref. [10]).
- **COLREGS 1972** – Reglamento Internacional de 1972 para prevenir colisiones, (Ref. [11]).
- **MSC/Circ. 98** – Guía para el diseño, construcción y operación de naves sumergibles, OMI, (Ref. [12]).

3. HISTORIA SUBMARINA



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



La idea de navegar bajo el mar es tan remota como la de volar por los aires. Desde el comienzo de la civilización, se han inventado mil y una maneras de llegar a las profundidades marinas.

Solo los más atrevidos se disponían a traspasar los dominios prohibidos de la naturaleza humana, motivados por la curiosidad de explorar los abismos misteriosos del océano, comprobar la existencia de monstruos marinos y satisfacer las ansias de conocimiento, comenzaron a crearse una serie de artilugios que permitiesen al hombre alcanzar el fondo del mar. Éstos son los llamados ingenios submarinos.

Estos ingenios se clasifican en dos tipos: los primarios, que someten al hombre a la presión de la profundidad y que se engloban dentro del llamado “método de la campana”, y los más evolucionados, que permiten al hombre estar sometido únicamente a la presión atmosférica, pertenecientes al “método del sumergible”.

En el primer grupo se incluyen campanas llenas de aire muy rudimentarias, como la que utilizó Alejandro Magno, en el 330 A.C. (Figura 1), considerado uno de los primeros exploradores del fondo del mar.



Figura 1: Alejandro Magno explorando el mar dentro de un ingenio de cristal. Ilustración anónima de *Le Livre et la vraye hystoire du bonroy Alixandre*, c.1.400-c.1.425. (BritishLibrary). Fuente: Inmersión, la aventura del fondo del mar. Exposición Monturiol. Museo Marítimo de Barcelona (MMB).

Más adelante, en las Guerras Púnicas (264-146 A.C.), ya se dispone de rudimentarios equipos de buceo, que permiten pasar por debajo de las naves, barrenarlas y hundirlas.

Sin embargo, estas primeras inmersiones de la antigüedad no dejan de ser los primeros escarceos del hombre bajo el mar, pero como simple buceador, en ningún caso se encuentran referencias de vehículos submarinos. Para ello deberían pasar más de 1500 años, cuando tras la Edad Media, finaliza esta etapa en la que el hombre vive de espaldas al mundo submarino, y ya en el siglo XVI, aparecen odres, como el ideado por Alfonso Borelli, o el *Hydrostatde Payerne*, y escafandras, con origen en un invento del francés Jean-Baptiste de la Chapelle, del Siglo XVIII.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



La historia del segundo grupo se remonta también al Siglo XVI, donde el hombre comenzó a pensar seriamente en diseñar sumergibles y submarinos.

En 1578, el Británico William Bourne, diseñó la primera embarcación para la navegación submarina. Era un barco completamente cerrado que podía ser sumergido y conducido con remos bajo la superficie del agua. Con un marco de madera y piel impermeable, estaba basado en tanques de lastre que eran llenados para sumergirse y vaciados para emerger, los mismos principios que hoy se usan en los submarinos. Aunque la idea de Bourne nunca pasó de la mesa de dibujo.

El primer intento serio de construir un submarino corre a cargo del médico holandés residente en Inglaterra, Cornelius Van Drebbel (Figura 2), en 1620, que apoyado por el rey Jacobo I de Inglaterra, diseñó y construyó una barca sumergible de madera recubierta de piel de cabra engrasada, con propulsión dotada de seis remos por banda, accionada desde el interior, que consiguió navegar varios kilómetros por el Támesis, sumergida a una profundidad de 4 metros con 15 tripulantes de los cuales 12 eran remeros. Fue el primer submarino que pudo navegar unas pocas horas.

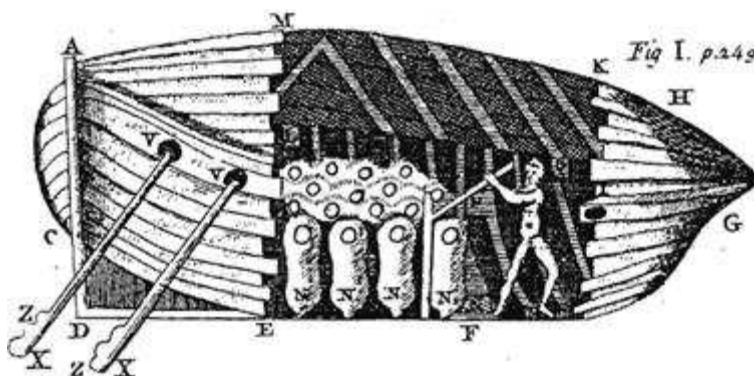


Figura 2: Submarino de Drebbel. Fuente: www.histarmar.com.ar.

Van Drebbel diseñó otros dos modelos más grandes, pero pese a sus exitosas demostraciones, la invención no consiguió despertar el interés de la Armada Británica, en una época en la que la posibilidad de un combate submarino estaba aún muy lejana en el futuro.

En 1680, el italiano Giovanni Borelli ideó un artefacto capaz de sumergirse y emerger. Se trataba de una embarcación con varias pieles de cabra insertadas en el casco, cada una conectada a una abertura en el fondo. El inventor planeaba sumergirla llenando las pieles con agua y emerger sacándola con una barra de torsión. Aunque nunca se construyó, el submarino de Borelli aportó la primera aproximación al moderno tanque de lastre.

Durante el resto del Siglo XVII y hasta bien avanzado el Siglo XVIII se construyeron numerosos botes sumergibles inspirados en el de Van Drebbel.

A finales del Siglo XVIII, en 1776, se produce lo que podríamos llamar el fin de la prehistoria del submarino con la aparición de dos artefactos que revolucionaron el arte de navegar bajo el mar, el *Turtle* (Figura 3), de David Bushnell, un graduado de Yale, construyó un vehículo submarino monoplace de madera forrada con planchas de cobre, de 8 toneladas de desplazamiento y se sumergía admitiendo agua dentro del casco y achicándola con una bomba manual.



Figura 3: Turtle de Bushnell (1776). Fuente MMB.

En 1797, el estadounidense Robert Fulton construyó en Francia el *Nautilus*, primer sumergible en incorporar dos sistemas separados de propulsión: una vela mientras navegaba en la superficie y una hélice con una manivela mientras estaba sumergido. También llevaba grandes frascos de aire comprimido que permitían a sus dos tripulantes permanecer sumergidos durante cinco horas. Desplazaba 19 toneladas y tenía una eslora de 6.5 metros, tripulado por 4 hombres, disponía de unas formas alargadas, más adecuadas para la navegación que las del *Turtle*. Disponía además de unos timones de buceo inéditos en la época y podía permanecer sumergido de 6 a 24 horas a unos 8 metros de cota.

Del segundo tercio del Siglo XIX, destacan otras aportaciones, como los *Brandtaucher* del alemán Wilhelm Bauer, en 1850, con un desplazamiento de 35 toneladas, unos 8 metros de eslora, cuya parte motriz fue la característica más innovadora, puesto que funcionaba con una hélice accionada por un eje movido por un sistema de jaula de ardilla, con dos hombres que la hacían girar.

El *H.L. Hunley*, propulsado por una hélice que se movía por medio de una manivela accionada por 8 hombres y el *Plongeur*, que resolvió el problema de la propulsión usando aire comprimido, también pertenecen a esta misma época. Casi todos cumplían fines militares y alcanzaban muy poca profundidad.

En España, en 1856, Narciso Monturiol, creó su *Ictíneo* (Figura 4), botado en Barcelona, con casco de madera en forma de pez y pensado para estudios oceanográficos y facilitar la pesca de coral. El submarino tenía doble casco, estaba equipado con una serie de herramientas específicas para dicho fin y se movía por energía humana.

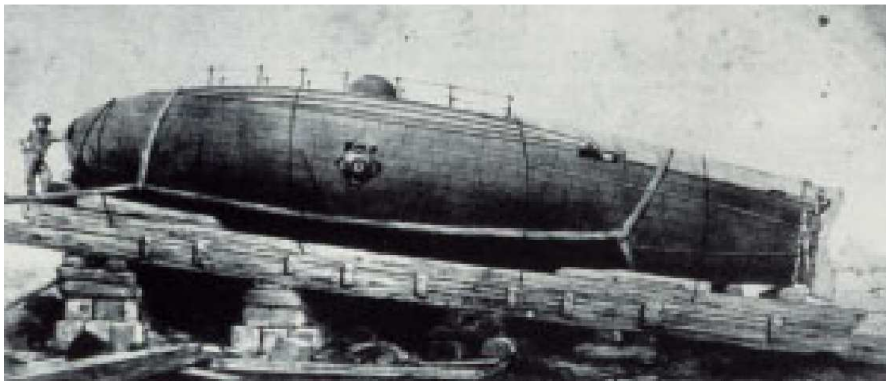


Figura 4: Ictíneo I de Narciso Monturiol (1856). Fuente: MMB.

Los inventores se dieron cuenta de que debían encontrar un método de propulsión mejor que la fuerza humana; mientras tanto, no valía la pena el esfuerzo de construir submarinos.

Años más tarde, la colaboración entre Garret y Nordenfelt condujo a una serie de submarinos impulsados a vapor, conocidos como “los Nordenfelt”, siendo el primero de la serie el *Nordenfelt I*, en 1885, un buque de 56 toneladas y 19,5 metros de eslora, con una autonomía de 140 millas y armado con un único torpedo.

En 1887, en España, Isaac Peral y Caballero inventa un submarino construido con planchas de acero (Figura 5), con formas muy cercanas a la de los submarinos actuales. Es el primer submarino operativo que dispone de baterías, motor eléctrico, timones de buceo y de dirección. De unos 20 metros de eslora y 3 de manga, alcanza una profundidad de 10 metros y una velocidad en inmersión de 3.5 nudos.

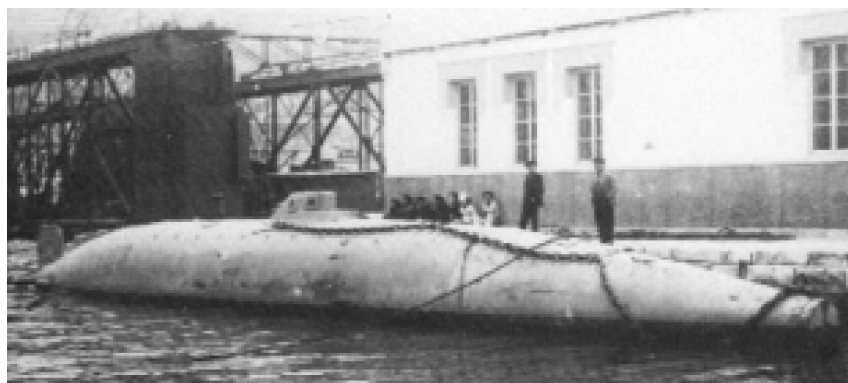


Figura 5: Submarino de Isaac Peral (1887). Fuente: MMB.

Muy poco después del submarino de Peral, se bota en 1888, en Francia el *Gymnote*, torpedero submarino, diseñado por Gustave Zédé, de 17 metros de eslora, 1.8 metros de manga y unas 30 toneladas de desplazamiento. El sistema de propulsión era a base de un motor eléctrico de unos 60 CV alimentado por baterías a 220 V, el cual podía mantener una velocidad de 10 nudos durante unas 6 horas.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



Los *Nordenfelt*, el *Peral* y el *Gymnote*, de características muy similares, eran submarinos de tipo militar, los dos últimos equipados con torpedo y periscopio, que les permitía atacar sin ser vistos desde superficie.

El Irlandés John P. Holland pre-diseña la serie de submarinos Holland que se caracterizan por un casco de forma fusiforme con doble fondo para los tanques de lastre. El primer submarino eficaz de esta serie fue el *Holland VII*, en 1897, de 165 toneladas, que llevaba una máquina de vapor de 150 CV para navegar en superficie y dos motores eléctricos con una potencia total de 220 CV para inmersión. La mayor parte de los submarinos norteamericanos que participaron en la Primera Guerra Mundial estuvieron basados en su diseño.

En 1899, el Francés Laubeuf crea un nuevo concepto, “el sumergible autónomo”, siendo el *Narval*, de 200 toneladas, con cuatro tubos lanzatorpedos y propulsión mixta; máquina de vapor y motores eléctricos, considerado el primer submarino moderno de Europa. A diferencia de los predecesores, su cubierta era plana, y no en forma de huso, como hasta entonces. Lo que supuso un ejemplo en cuanto al diseño, que fue seguido por todos los submarinos europeos que participaron en las dos guerras mundiales del Siglo XX.

A principios del Siglo XX, puede decirse que con el *Narval* se abandona el concepto de propulsión única y se generaliza el uso de la propulsión mixta del submarino autónomo, desarrollándose diversos tipos, derivados del de Zéné y del *Narval*: *Sirène* (1900), *Nalade* (1902), *Algrette* (1902), *Omega* (1903), *Emeraude* (1903), *Circe* (1904), *Pluviose* (1906), *Savants* (1909), en los que predominan las características concebidas por Laubeuf.

El estallido de las dos guerras mundiales triplicó la construcción de submarinos militares. Los *U-boot* alemanes, predecesores de los submarinos modernos, se construyeron con dos cascos completos, con el casco de presión totalmente cubierto por el exterior, lo que optimizaba la navegación submarina. Además, se aplanaron, y se hicieron retráctiles los hidroplanos, los periscopios y las antenas. Permitían bajar sin peligro a los 280 metros de profundidad.

Durante los años posteriores a la segunda guerra mundial aparecieron submarinos con mayor autonomía, pero los motores diésel y eléctrico permanecieron como sus únicas fuentes de propulsión hasta que en los años 50 apareció la energía nuclear. En 1954 fue fabricado en los Estados Unidos el primer submarino nuclear, basado en el tipo XXI alemán. Éste fue bautizado como *Nautilus* (Figura 6).



Figura 6: Primer submarino nuclear Nautilus (1954). Fuente: MMB.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



En los años siguientes, el submarino fue perfeccionado con el diseño de un nuevo casco en forma de lágrima que reduce tanto el ruido como la resistencia del agua, además de permitir mayor velocidad y maniobrabilidad.

Con la combinación de tecnología de computadora, navegación de precisión, regeneración atmosférica, equipo sensitivo de sonar y armas de precisión, los submarinos de guerra se encuentran entre las máquinas más avanzadas que jamás se han construido.

En la actualidad, existen más de 600 submarinos en el mundo, pertenecientes a 43 países. Todos los de Estados Unidos y el Reino Unido son nucleares, pero muchos submarinos modernos aún son propulsados por motores diesel. China, Francia y Rusia cuentan con algunos submarinos nucleares, siendo este último país el que cuenta con mayor número de naves, de ambos tipos.

La dedicación de las investigaciones a la construcción de submarinos de tipo militar, provocó que, durante la primera mitad del Siglo XX, no se produjese prácticamente ningún avance en los sumergibles científicos.

Estos sumergibles, aparecieron a partir de la II Guerra Mundial, siendo llamados así las naves que pueden bajar y subir dentro del mar para luego hacer un desplazamiento por el fondo a distintas profundidades, pero a diferencia de los sumergibles militares, estos de tipo civil o investigación, suelen caracterizarse por estar capacitados sólo para cortos recorridos, por lo que suelen necesitar un barco de apoyo.

El diseño de los mismos, pretende optimizar el espacio útil interno, así como minimizar el peso, facilitando de esta manera su transporte. Otro de los objetivos de investigación más ambiciosos, es integrar una plataforma de sensores en un vehículo sumergible tripulado, lo cual le daría una alta modularidad y simplicidad en el momento de integrar instrumentación y sensores, y una gran versatilidad y eficiencia para llevar a cabo diferentes tipos de misiones.

Suelen tener una cota de profundidad media o baja, a diferencia de los militares que llegan a cotas altas, también sus medidas son bastante reducidas, nada que ver con los monstruosos submarinos nucleares y esto implica que su tripulación se reduzca a 2-3 personas. Poseen un carenado hidrodinámico y un casco de presión de morfología esférica, aunque la presencia de nuevos materiales está consiguiendo estilizar su figura.

Se calcula que hasta la actualidad, sólo se ha explorado entre el 2 y el 5 % del territorio de mares y océanos del planeta. Uno de los principales problemas que frenan los esfuerzos de la exploración de los océanos es la dificultad y los problemas tecnológicos asociados a este medio, lo que hace que sean necesarios materiales y diseños tecnológicos complejos. Éstos son los obstáculos con los que se encuentra el diseño de los sumergibles del futuro.

4. OBJETIVO



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



El objetivo del presente proyecto es realizar el diseño y cálculo estructural del casco resistente de un sumergible independiente monocasco, construido con cuadernas interiores, dedicado a trabajos de investigación.

Entendiéndose como casco resistente a la envuelta o estructura cerrada que permite resistir la presión exterior del mar (hasta la profundidad calculada de colapso) y tener a la dotación y a las máquinas interiores a salvo y en seco, cuando el sumergible está en inmersión. Se compone del forro, de espesor grueso, que separa el mar de la zona interior, más aquellas estructuras de soporte de éste, como pueden ser las cuadernas, bulárcamas, reforzados locales y mamparos resistentes.

Entendiéndose como sumergible monocasco aquel en los que su casco resistente se queda a la vista, desnudo, en la mayor parte de la eslora, al no llevar una envuelta exterior completa. Sus formas geométricas son sencillas utilizando cilindros, cuerpos de cono y domos esféricos.

Donde sus ventajas principales frente al doble casco son:

- Construcción más sencilla.
- Mejor inspección y mantenimiento del casco resistente al estar a la vista en casi toda su eslora.
- Mayor espacio útil interior, para las mismas dimensiones exteriores.

Su cota nominal de buceo (NDD) o cota máxima a la que el sumergible puede navegar en condiciones normales es de 500 metros y el material utilizado para la construcción es acero de alto límite elástico.

Está compartimentado en tres espacios estancos, su propulsión será de tipo Diesel/Eléctrico y dispondrá de una capacidad para 8 personas, de las cuales, 3 son tripulación y las otras 5, son personal de investigación, como científicos, técnicos o ingenieros.

Se tomará como referencia las directrices de resistencia estructural de la *Germanischer Lloyd*: "Rules for Classification and Construction. I, Ship Technology. Part 5, Underwater Technology. Chapter 2, Manned Submersibles. (Edition 2009)". (Ref. [1]), debiendo proponer una solución constructiva completa del casco y elementos estructurales que lo componen, así como los aspectos más relevantes relativos a la soldadura y estrategia constructiva adoptada.

Donde los únicos datos de partida definidos para el cálculo del casco resistente son:

ESLORA	30 m
NDD	500 m
Nº DE CUBIERTAS	1
DIESEL/ ELÉCTRICA	

5. GENERALIDADES



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



Sus usos incluyen la investigación e inspección submarina, estudio del ambiente marino en aplicaciones navales y comerciales a través de la plataforma continental y aguas costeras (500 m). Su configuración de potencia Diesel/Eléctrica permite un tránsito rápido independiente, gran autonomía en inmersión y capacidad de cubrir grandes áreas.

Este sumergible está diseñado para aplicaciones de largo alcance y grandes áreas de trabajo, incluyendo:

Aplicaciones de estudio e investigación marina:

- Biología Marina.
- Arqueología Submarina.
- Monitoreo de ecosistemas.
- Estudio del fondo del mar.
- Estudios de hábitat marinos.
- Estudios geológicos.
- Estudios de migración de especies.
- Muestreo de aguas y sedimentos.
- Muestreo de especies marinas.
- Mapeo de fondos.

Además, se puede ver cumplimentado con el desarrollo de aplicaciones Industriales en el océano, como pueden ser:



- Inspección de tuberías y cables eléctricos.
- Evaluación ambiental de desechos.
- Preparación y ejecución de actividades de rescate y salvamento.
- Fotografía submarina y video grabación.
- Actividades de seguridad y protección de instalaciones costeras y submarinas.

El cuerpo del sumergible se divide en tres compartimentos estancos independientes unidos. La parte frontal es de forma esférica con un puerto hemisférico panorámico de observación de 1 m de diámetro. Aquí también se localizan todos los aparatos de investigación y la cámara de mando con todos los dispositivos de control del sumergible (equipo de gobierno, paneles y consolas de control, mando de válvulas y bombas, etc.).

En la parte central o cuerpo cilíndrico se localiza el punto de acceso al exterior, la habilitación con los camarotes y todos los servicios sanitarios y alimenticios, y en el doble fondo, debajo de los teclés del suelo, se localizan las baterías.

En el compartimento de popa se localiza la cámara de máquinas, siendo los equipos más significativos: motor diésel, motor eléctrico, generador de energía, armarios eléctricos y bombas de lastre.

El modo de propulsión utilizado, será una combinación Diesel/Eléctrica. El motor diesel genera potencia suficiente para navegación en superficie y cargar las baterías simultáneamente, y el motor eléctrico generará la potencia necesaria para navegación en inmersión, alimentándose del grupo de baterías.

	<p align="center">Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL</p>	
---	--	---

Para una mayor maniobrabilidad, el sumergible dispondrá de una hélice transversal de proa localizada en la estructura ligera (superestructura) accionada mediante un pequeño motor eléctrico, el cual, también se alimenta del grupo de baterías.

El sistema de lastre consiste en tres tanques localizados en la superestructura, son llenados por gravedad y vaciados por bombas con sistemas de seguridad para grandes presiones.

Los sistemas de soporte vital están compuestos por tres botellas de oxígeno de 50 litros (ya que no dispone de equipo de generación de oxígeno), con válvulas de dosificación y sistemas de monitorización de oxígeno, hidrógeno y dióxido de carbono. También se localizan filtros fijadores de CO₂ instalados a lo largo del sumergible.

Otras características de interés:

- Sistema de precisión de navegación.
- Brazos manipuladores con seis funciones.
- Sistema de sonar lateral de multifrecuencia computerizado.
- Cámaras digitales de video y sistema de grabación.
- Equipos de obtención de muestras.
- Focos dirigibles.
- Equipos de análisis y control.

6. FORMAS DEL CASCO



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



6.1 INTRODUCCIÓN

Las formas exteriores del casco de un sumergible han evolucionado desde aquellos diseñados para poder simplemente pasear por debajo del agua, o navegar en superficie a cierta velocidad, hasta los presentes sumergibles que navegan totalmente en inmersión.

Desde el punto de vista estructural, los sumergibles están compuestos por un casco resistente que soporta la presión hidrostática exterior y que forma el recinto que aloja la dotación, propulsión, y otros equipos sensibles y una envoltura ligeramente resistente para el almacenamiento de lastres, combustible...etc, y que están sometidos a la presión ambiente.

En este tipo de sumergibles, por no ser la velocidad un factor decisivo, las formas exteriores no son críticas, pero es evidente que las formas elongadas presentan una menor resistencia al avance que las formas muy redondas y aquellas dotadas de muchas aristas. Las formas del casco afectan sensiblemente a la resistencia al avance del sumergible en superficie y en inmersión, por lo cual, para que la potencia propulsora sea moderada, se necesita que las formas sean las más adecuadas.

Una buena terminación superficial permite eliminar o reducir los ruidos producidos por las irregularidades o protuberancias existentes en la capa superficial del casco, formada por todos aquellos objetos que sobresalen del casco exterior, o los pasos del mismo.

Además, el ruido generado por el flujo de agua que pasa alrededor del casco, (adicionando el producido por la hélice), es un fenómeno que se tiene muy en cuenta, ya que al tratarse de un sumergible de investigación, es un fenómeno muy perjudicial para la realización de ciertas tareas de estudio del entorno marino.

La relación eslora/diámetro (L/D) de un sumergible es un parámetro fundamental en la resistencia al avance. Determina la extensión de superficie mojada, de la cual se deduce la resistencia friccional y la superficie frontal, de la cual se deduce la resistencia residual o de formas. Donde la resistencia friccional es, en sumergibles monocasco, cerca del 90% de la total.

Optimizar para tener una baja resistencia por fricción, que conduce a cuerpos muy cortos y anchos, es opuesto a optimizar para tener una baja resistencia de formas. El compromiso está en unas formas con una relación eslora/diámetro (L/D) adecuadas.

Puesto que la penalización en resistencia por aumentar la relación L/D no es muy grande, los sumergibles se diseñan con relaciones mayores a las óptimas por necesidades constructivas principales (evitar diámetros muy grandes, tener longitud cilíndrica importante, cascos con menores espesores de planchas, etc.).

El casco resistente está recubierto en sus extremos por una superestructura, normalmente de materiales compuestos, que le proporciona el alisado de las formas, y que suele alojar el combustible o los tanques de lastre.



6.2 DIMENSIONES GENERALES

Se ha de llegar a una relación entre eslora y diámetro (L/D) para poder alcanzar los requisitos operativos sin que se vea incrementada significativamente la resistencia al avance.

La resistencia al avance de un cuerpo elongado se compone de dos partes: una debida a presión que ejerce el agua al tener que separarse y otra debida a la fricción de su superficie con el agua.

La resistencia friccional, para una velocidad dada, es dependiente fundamentalmente de la extensión de superficie mojada y el número de Reynolds. La resistencia de presión o “de formas” incluye la de separación flujo más la resistencia producida por el choque de agua con objetos sobresalientes, orificios, etc. Se demostró que para una serie de formas del mismo volumen, totalmente lisas, la resistencia total se minimiza para una relación L/D entre 6 y 6,2. Ver siguiente figura.

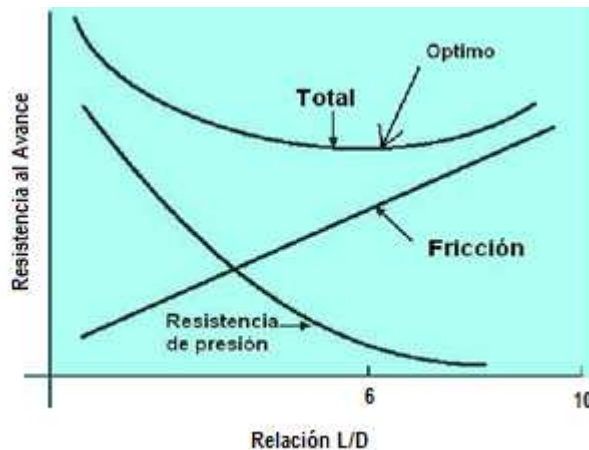


Figura 7: Resistencia al avance – Relación L/D para formas elongadas.

Sin embargo, una relación $L/D = 6$ ideal a efectos de presentar la mínima resistencia al avance, invita a construir sumergibles bastante mangudos, lo que implica a su vez cascos resistentes de gran diámetro y de un espesor proporcional. Puesto que el diámetro del casco resistente es un parámetro que influye negativamente en la capacidad de este de resistir la presión exterior y el aumento de espesor lo hace negativamente incrementado el coste, se conduce a escatimar dimensiones transversales a favor de las dimensiones longitudinales, y en consecuencia a salirse de los cánones ideales que minimizaban la resistencia.

El sumergible propuesto es monocasco y tiene una cota nominal de buceo (NDD) de 500 metros, esto hace que sea imprescindible para cumplir los requisitos operativos sin incrementar excesivamente el espesor del casco resistente, cumplir con la relación actual de sumergibles independientes: $L/D = 9 - 11$ alejada de los cánones ideales.

Esto hace que la solución seleccionada sea la relación $L/D = 10$ con lo que el diámetro del sumergible serán 3 metros.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



6.3 PARTE CENTRAL

La parte cilíndrica central del casco resistente, su diámetro y eslora, (sin contar los eventuales conos reductores en las secciones de popa) viene forzada por las necesidades de la disposición y por cuestiones constructivas. La parte cilíndrica puede llegar a ser del orden del 50% de la eslora total del sumergible.

La parte central del casco resistente no dispone de doble forro, estando los fluidos almacenados en la superestructura y el extremo de popa que dispone de tanques adosados al casco resistente y son los que le proporcionan la hidrodinámica.

6.4 FORMA DE PROA

Debido a que los sumergibles de investigación no precisan de sónares pasivos ni tubos lanza torpedos como los submarinos militares, sus velocidades nominales de servicio son bajas y suelen disponer de un punto de observación en proa, las formas de esta parte, están sujetas sólo a los condicionantes impuestos por las SSCC.

Donde, la normativa utilizada "Rules for Classification and Construction. I, Ship Technology. Part 5, Underwater Technology. Chapter 2, Manned Submersibles. (Edition 2009)". (Ref. [1]), en el anexo A, "Calculation of the Pressure Hull" punto F.7 – Spherical shells and dished ends, sólo contempla la forma semi-esférica como forma para la creación del de domo de proa.

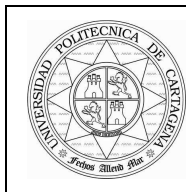
6.5 FORMA DE POPA

La forma de popa está compuesta por la parte del casco que se extiende entre la parte cilíndrica central y el extremo del domo de popa.

Las formas de la popa están dictadas fundamentalmente por la necesidad de que el flujo de agua que llega a los timones y a la hélice sea el adecuado, radialmente uniforme y sin que haya desprendimiento de la capa límite. No obstante, las popas que son buenas para una prueba de remolque no tienen por qué serlo al 100% para una prueba de autopropulsión y viceversa.

Existen compromisos importantes en la longitud de la forma de popa y en su coeficiente prismático. Desde el punto de vista hidrodinámico conviene que la popa sea bastante alargada, con un ángulo de cono reducido ya que así no hay problemas con la entrada de agua en la hélice. Al mismo tiempo, si el diámetro del cono de cola es pequeño, se pueden alojar mejor los timones sin que sobresalgan demasiado de los costados o del perfil trasversal del buque.

En la zona de popa, la capa límite llega muy ancha, con riesgo de que pueda haber separaciones o desprendimientos dando lugar a cavitación, por lo cual, hay que evitar formas de popa excesivamente cortas y cerradas.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



Los valores de “n” (relación entre la eslora del cuerpo de popa y el diámetro $L_{cpp}/D = n$) más comunes son los comprendidos entre 2 y 2.5, que se corresponden con unos coeficientes prismáticos del cuerpo de popa de valor 0.53 y 0.6. Pasar de un valor de coeficiente prismático de 0.65, es decir, popas muy recortadas, puede suponer una ruptura de la capa límite, lo cual no interesa en absoluto, así que hay que limitarse a valores inferiores del coeficiente prismático (o lo que es lo mismo, $n > 2.5$).

Para el diseño de este tipo de sumergibles monocasco, las secciones del casco resistente pueden ir formando troncos de cono conforme se acercan a las zonas de popa, donde el semiángulo del cono en el extremo de popa está comprendido entre 14 y 20 grados, en vista de las probabilidades de desprendimiento y cavitación. Siendo esta configuración estructural adecuada para profundidades pequeñas o medias (de 100 a 1000m).

Cuando se emplean reducciones del casco resistente hacia popa, la forma en que estas se reducen debe representar un trazado adecuado, que puede estar representado por una línea quebrada inscrita, promediada o circunscrita en una curva continua que no tenga cambios de curvatura exagerados.

Para el domo de popa, al igual que sucede en proa, la normativa utilizada “Rules for Classification and Construction. I, Ship Technology. Part 5, Underwater Technology. Chapter 2, Manned Submersibles. (Edition 2009)”. (Ref. [1]), en el anexo A, punto F 7 – Spherical shells and dished ends, solo contempla la forma semi-esférica.

La superestructura en las proximidades de la hélice es preferible que sea un cono puro, a partir de los timones hacia popa, ya que son formas de una mayor sencillez constructiva y con una menor presión de desprendimiento de la capa límite. Su misión es alojar la línea de ejes y los mecanismos de los timones.

6.6 FORMA DE LA SUPERESTRUCTURA

La superestructura, pasarela o cubierta de navegación, es una estructura impuesta por la necesidad de alojar muchos elementos en su interior y hacer factible la circulación de personal para las labores de amarre, tránsito hacia las escotillas de acceso, etc. La altura de esta estructura está dictada por la altura del mayor aparato que deba contener, estando comprendida para sumergibles pequeños entre 0.5 y 1 metro. Su forma es de cajón sobre la parte superior del casco amoldándose a las formas de este sin sobresalir en manga.

La anchura de la pasarela (parte pisable) de la superestructura es aproximadamente de 1/2 del diámetro del casco, lo suficiente para que los tripulantes puedan pasar a realizar maniobras en cubierta si es necesario. Además, esto limita la resistencia añadida al avance, no sólo por la superficie mojada adicional, sino por la fuerte alteración de las formas que ello representa.

Su estructura es de acero recubierta de placas de materiales compuestos, moldeada y atornillada al borde de los refuerzos con la cabeza de los tornillos achaflanada. Tiene que estar muy bien integrada con el casco principal y abrazarlo sin discontinuidades para minimizar la resistencia.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



6.7 FORMA DE LA VELA

La vela es el apéndice que más sobresale del casco. Dispone de una puerta que permite el acceso de la tripulación al interior del sumergible mediante una escotilla ubicada a la parte central. También alberga los conductos del snorkel y algunas antenas de radio, telecomunicaciones y las luces de navegación.

La forma general de su sección horizontal será la de un perfil hidrodinámico tipo NACA o similar donde el borde de entrada es redondeado y el de salida es afilado. La parte superior de la vela será totalmente plana, provista de orificios por donde pasa el snorkel y las antenas.

Su estructura es de acero recubierta de placas de materiales compuestos (fibra de vidrio reforzada), moldeada y atornillada al borde de los refuerzos con la cabeza de los tornillos achaflanada. Conviene que su tamaño sea lo más reducido posible, su relación anchura/longitud no sobrepasará de 0.2 con el mayor espesor situado a una abscisa de 30-35% de la longitud.

6.8 PENETRACIONES DEL CASCO

Las penetraciones que se le realizan al casco resistente de un sumergible son de muy diversa naturaleza, desde el simple paso de una tubería al exterior como toma de mar, hasta la que permite labores de mantenimiento y reemplazo de los motores, sin olvidar las de acceso. A continuación, se explican las tres aberturas más importantes en cuanto a dimensiones.

- Escotilla: Orificio destinado al paso de personal o de material. Las que atraviesan el casco resistente están provistas de una estructura de refuerzo y una tapa que debe de ser estanca y resistente a la máxima presión de inmersión.

Se localizan dos escotillas, una en la parte central del sumergible, en el interior de la vela, que es la escotilla principal de acceso, la otra, situada en el extremo de proa, en la zona de laboratorio e investigación, usada como acceso secundario y cuya principal función es de uso logístico.

Ambas serán operables desde ambos lados por una sola persona y se asegurarán al exterior cuando esté en posición abierta para permitir un paso seguro.

Su dimensión se define en la Sección 3 "Principles for Design and Construction. D, 4" de la GL (Ref. [5]). Siendo su diámetro mínimo de 500 mm.

- Esclusa: Es un recinto dotado de dos escotillas que separa dos medios (que pueden estar a diferentes presiones), permite el tránsito a través de ella sin que haya necesidad de comunicar totalmente dichos medios.

Ubicada en la parte de central del sumergible, destinada a servicios de salvamento y rescate.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



- Brecha: Escotilla de grandes dimensiones destinada al embarque/desembarque de grandes aparatos como puede ser el MEP o los grupos diesel, a efectos de proceder a su mantenimiento periódico o reparaciones en taller.

Localizada en el compartimento de popa, en la cámara de máquinas, justamente encima de la ubicación de los motores y equipos auxiliares.

6.9 PLANO DE FORMAS DEL CASCO EXTERIOR

Cumpliendo con todos los parámetros constructivos marcados en los apartados anteriores (6.1 – 6.8), se ha realizado el plano de disposición general de la estructura exterior del sumergible “Plano de Formas del Casco Exterior” (Anexo V), donde en la siguiente figura se puede ver una imagen del mismo.

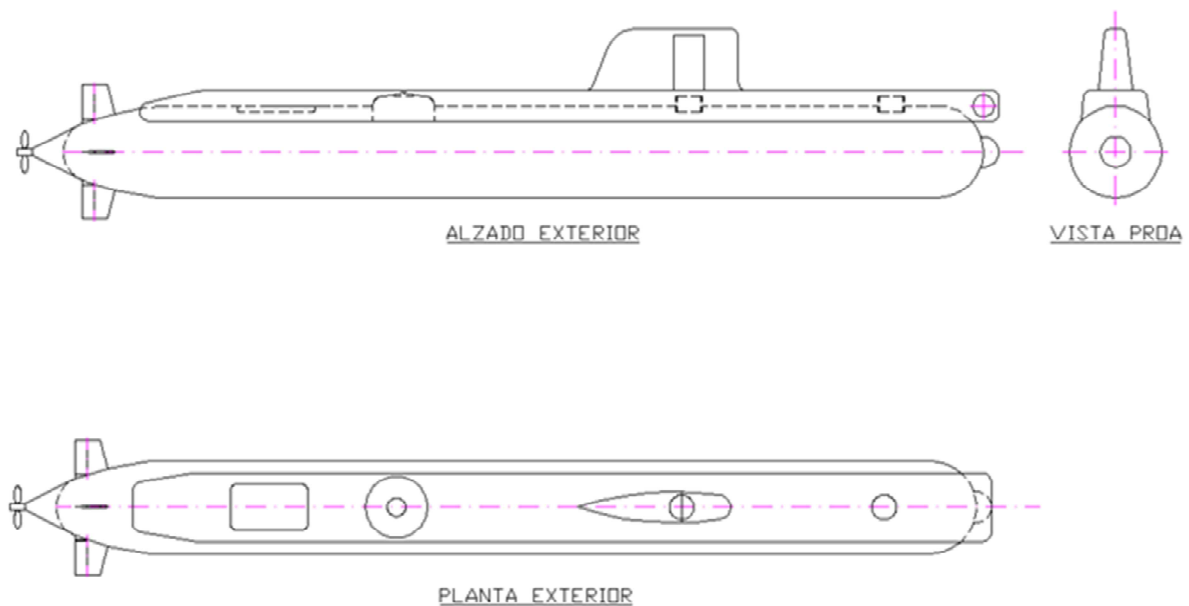


Figura 8: Plano de Formas del Casco Exterior.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



Siendo las características principales del sumergible:

ESLORA TOTAL	31.50 m
MANGA TOTAL	4.35 m
PUNTAL TOTAL	5.50 m
DESPLAZAMIENTO EN SUPERFICIE	200 t
DESPLAZAMIENTO EN INMERSION	230 t
ESLORA CASCO RESISTENTE	30.00 m
DIAMETRO CASCO RESISTENTE	3.00 m
NDD	500 m
Nº CUBIERTAS	1
DOTACIÓN	3
PERSONAL DE INVESTIGACION	5

Otras características de interés:

ESLORA CUERPO DE PR	6 m
ESLORA CUERPO CENTRAL	15 m
ESLORA CUERPO DE PP	9 m
SEMIANGULOS PP	10° y 17°
ALTURA SUPERESTRUCTURA	0.5 m
PUNTAL VELA	2 m
ESLORA VELA	5 m
MANGA VELA	1 m
Ø ESCOTILLAS	0.8 m
Ø ESCLUSA	2 m
DIMENSIONES BRECHA	2.5 x 1.5 m

7. ESTRUCTURA



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



7.1 INTRODUCCIÓN

En este apartado se dan unas indicaciones sobre la elección del tipo de estructura y unas guías generales para diseñar la estructura de un sumergible.

Es evidente que para conseguir estructuras cilíndricas resistentes a presiones exteriores relativamente grandes no es suficiente la utilización de cilindros simples, pues su presión de inestabilidad o de abolladura es excesivamente baja, aunque por tensiones, su resistencia pueda ser potencialmente mayor.

Puesto que el colapso por inestabilidad es función, en líneas generales, de la inercia transversal de la pared del cilindro (forro), es necesario aumentar esta inercia si se quieren conseguir las presiones de inmersión deseadas.

La elección del tipo de estructura obedece a la necesidad de ofrecer una respuesta eficaz a las solicitaciones que actúan sobre ella. Por ello es necesario analizar estas solicitaciones, así como cuáles son las respuestas de la estructura a dichas solicitaciones y los posibles modos de fallo.

En la mayoría de los casos la única carga que se considera en el cálculo estructural es:

- Presión hidrostática estática exterior a la cota de colapso (CDD) de la estructura.

Siendo los cascos de los submarinos y sumergibles las estructuras soldadas más grandes que existen resistentes a la presión.

En la actualidad, el coeficiente de seguridad para la estructura completa oscila de 1.50 a 2, para profundidades moderadas. Un coeficiente tan pequeño obliga a conocer perfectamente cómo se produce la rotura o ruina de la estructura, a qué cargas y de qué forma, con el fin de asegurar su integridad en las condiciones normales de trabajo.

El margen de seguridad tan bajo obedece a la necesidad de ahorrar peso para equipos, propulsión, etc., sin los cuales el sumergible poseería unas cualidades operativas más reducidas.

Además, otro aspecto muy importante desde el punto de vista estructural, es la minimización del peso del acero con el objeto de reducir el coste del material, pero siempre y cuando los costes de producción no se incrementen por encima de lo que supone la reducción de material.

7.2 FORRO

Aumentar el espesor del forro, para combatir la inestabilidad, es un método inadecuado ya que exige unos espesores de forro respetables, antieconómicos, por lo que tradicionalmente, el sistema de reforzado ha sido por medio de cuadernas regularmente distribuidas. Esto permite obtener una gran rigidez frente a la inestabilidad general, ya que la combinación de la inercia propia de las cuadernas más la inercia de un cierto ancho de plancha de forro asociado a ellas, proporcionan una inercia total muy elevada, disminuyendo así el espesor del forro considerablemente.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



Las dimensiones del espesor del forro respecto al radio del casco resistente del sumergible ($t \approx R/100$), es un valor reducido, ya que son las cuadernas los elementos estructurales encargados de resistir los momentos flectores que se forman.

7.3 CUADERNAS

Una parte esencial de los cascos de los sumergibles son las cuadernas. Su cometido fundamental es asegurar la circularidad perfecta del forro que, por su poca rigidez propia, tiende a ovalizarse y colapsar a muy baja presión exterior.

Hay varias formas de cuadernas (ver figura 9), aunque la forma más utilizada es la de tipo "T" con alma soldada al forro tanto en la zona cilíndrica como en las zonas cónicas.

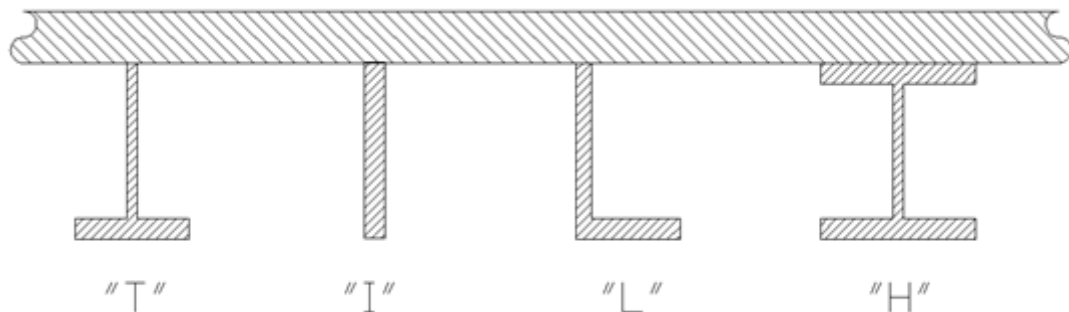


Figura 9: Principales formas de cuadernas.

Por tanto, el tipo de cuaderna seleccionado es en forma de "T" soldado al forro por el pie del alma, quedando el ala (o platabanda) paralela al eje del sumergible, a una cierta distancia, para que su momento de inercia sea el mayor posible. La soldadura se realiza en ángulo en ambos lados del pie del alma.

En esta solución constructiva, forro más cuadernas, tanto la tensión circunferencial como la longitudinal varían a lo largo y ancho de las claras (espaciado entre cuadernas). Además, por la aparición de momentos flectores inducidos por las cuadernas en el sentido longitudinal, las tensiones no son constantes con el espesor y también dan lugar a fuerzas cortantes. Ello es debido a la falta de continuidad de la rigidez longitudinal del forro a causa de las cuadernas que trabajan como puntos duros.

Evidentemente, el forro en el centro de las claras no está apoyado y sus deformaciones radiales son mayores que la parte de forro que apoya sobre la cuaderna. Por consiguiente, es esencial el adecuado dimensionamiento de la separación entre estos refuerzos para obtener un rendimiento adecuado de los mismos, que combine con una rigidización contra pandeo pero que no induzca excesivos esfuerzos al forro.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



En lo referente a la dimensión de la clara entre cuadernas, se suele tomar en la mayoría de los casos un valor cercano a los 600 mm, debiendo optimizar esta dimensión durante la fase de cálculo estructural.

7.4 MAMPAROS RESISTENTES

Para sumergibles costeros que navegan por la plataforma continental, en que las profundidades son pequeñas o moderadas (500 m), los mamparos intermedios desempeñan un papel aceptable a efectos de la creación de zonas de refugio ante posibles vías masivas de agua, a la espera de un vehículo de rescate.

Por estos motivos se suelen montar mamparos resistentes en el interior del casco resistente, subdividiéndolo en compartimentos. Para que los mamparos fuesen realmente efectivos, el volumen máximo de cada compartimento debería de ser inferior a la reserva de flotabilidad, lo que equivaldría a la necesidad de montar un número elevado de éstos a lo largo de la eslora, del orden de 8 ó 10, lo que implica a un peso del casco resistente inaceptable. Por consiguiente, se montan dos mamparos, subdividiendo el sumergible en tres compartimentos.

Por lo general, estos mamparos intermedios son planos con el fin de no entorpecer la disposición interior de aparatos, aunque exige un reforzado notable. También contribuyen a mantener la circularidad del casco resistente, con efectos beneficiosos sobre la presión crítica de colapso general y sirven como elementos delimitadores de zonas funcionales dentro del sumergible.

Puesto que producen una tracción radial muy grande sobre el forro, éste debe de ser reforzado con una virola de mayor espesor, llamando a este conjunto, anillo resistente (AR).

7.5 BULÁRCAMA

Puesto que los mamparos resistentes típicos suelen estar muy separados, si se calcula la presión crítica de pandeo para esta gran separación, las presiones críticas que resultan son relativamente bajas. Esto hace que instalar mamparos adicionales, para acortar las distancias, no entre dentro de lo razonable, por el peso extra que supone, los inconvenientes que produce en la disposición, en los servicios, etc., por todo esto, se recurre a instalar cuaderna fuerte o bulárcama que realice este papel.

El cálculo es similar al de una cuaderna normal y el dimensionamiento cumple los mismos criterios que se marcan en el apartado 7.6.

Estos elementos estructurales tienen algunas peculiaridades ya que se consideran punto fuerte (AR) y por tanto al igual que los mamparos han de ser reforzados con una virola, que los cubra circunferencialmente, de mayor espesor que el del casco resistente.



7.6 MODOS DE FALLO

Independientemente de la calidad de los materiales empleados y exceptuando aquellos fallos producidos por agrietamiento del material por no reunir las características de ductilidad necesarias, por defectos internos locales o defectos de soldadura y todos aquellos derivados de procesos tecnológicos inadecuados, los fallos por los que un casco resistente se destruye son, fundamentalmente, los que se describen a continuación.

Entendiendo como “fallo” el modo en que la estructura deja de ser útil para los fines a que se destina, es decir, mantener su capacidad resistente.

Los fallos más comunes de un recinto reforzado por cuadernas, sometido a presión estática exterior, se pueden clasificar en cuatro tipos:

- Fallo por inestabilidad de las cuadernas.
- Fallo por plastificación del forro.
- Fallo por inestabilidad del forro entre cuadernas.
- Fallo por inestabilidad general.

7.6.1 FALLO POR INESTABILIDAD DE LAS CUADERNAS

Las cuadernas tomadas en conjunto con el forro (Figura 10), por estar soldadas a éste, no pueden colapsar o deformarse independientemente de él, sobre todo cuando se consideran anillos macizos de una sección muy compacta. Pero las cuadernas reales están formadas por perfiles esbeltos que pueden adolecer de un dimensionamiento incorrecto de sus elementos, y éstos, sí pueden estar expuestos a deformaciones locales inadmisibles, que pueden ser el origen de los fallos.

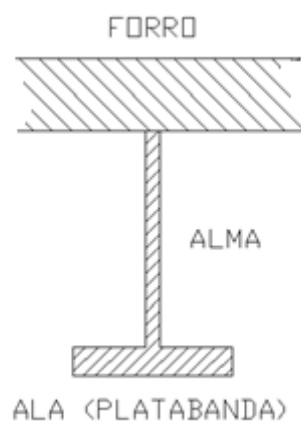


Figura 10: Composición de una cuaderna tipo “T”.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



Como consecuencia se deberán respetar unos criterios de dimensionamiento para evitar que, con el afán de reducir peso, se obtengan almas o alas muy esbeltas y expuestas a deformaciones o alabeos prematuros que pudieran acarrear la pérdida de su capacidad resistente provocando el fallo total de la estructura.

Puesto que las cuadernas utilizadas son de tipo “T”, y se componen sólo de dos piezas, ala y alma, el criterio más extendido y seguro para el dimensionamiento de estos elementos es el de establecer unas relaciones máximas entre la anchura y el espesor en alas y entre la altura y el espesor en almas.

Siendo los fallos más comunes que aparecen en las cuadernas los siguientes:

- Abolladura del alma, (A).
- Alabeo del ala, (B).
- Pandeo de las cuadernas como conjunto, (C).

Los fallos A y B corresponden a la inestabilidad de las almas o las alas tomadas de forma independiente cuando están sometidas a cargas axiales crecientes. Llega un momento en que las almas o las alas empiezan a abollarse formando ondas alternativas respecto del eje neutro del elemento (ver figura 11). Estos pandeos están favorecidos si el montaje y posicionamiento de las cuadernas sobre el casco resistente no está realizado correctamente.

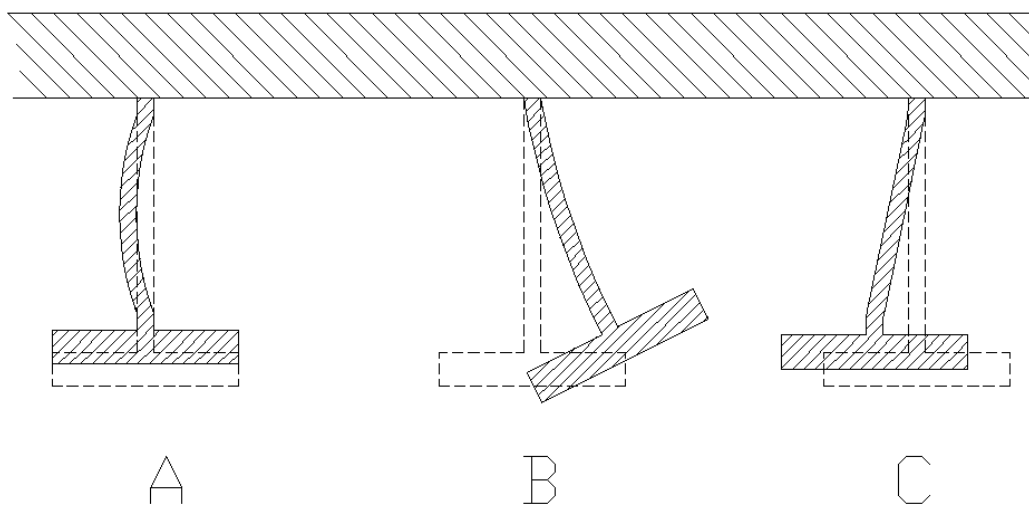


Figura 11: Tipos de pandeo de las cuadernas.

La abolladura del alma (tipo A) se produce en almas de muy poco espesor comparado con su altura. Consiste en una serie de abolladuras alternas que corren a lo largo del alma de la cuaderna, en sentido perimetral (siguiendo la circunferencia que forma el anillo). Las almas y alas están sometidas a compresión pura en sentido circunferencial, siendo pequeños los efectos debidos a la eventual flexión, a la fuerza cortante y a la tensión radial.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



Para que no aparezcan abolladuras antes de que el alma o ala alcancen el límite de fluencia, se adoptan unas relaciones altamente avaladas por la práctica tanto en estructuras industriales como en construcción naval, siendo ésta:

- anchura del ala / altura del alma (b_f/h_w) del orden de 50 al 75 %.

Cuando la cuaderna se somete a fuerzas radiales, las almas transmiten a sus alas parte de estas fuerzas radiales, tomando estas últimas tensiones circunferenciales que pueden ser muy importantes. Puesto que las alas no tienen un soporte lateral tienden a zafarse de las tensiones mediante alabeo de sus bordes en forma de senoide o volcando (tipo B). Para que el borde libre de las alas no se alabee por efecto de la compresión circunferencial a la que están sometidas, es necesario tener en cuenta las siguientes relaciones:

- espesor ala / anchura ala (s_f/b_f) del orden de 20 al 25 %.
- espesor alma / altura alma (s_w/h_w) del orden de 6.5 al 7 %.

Existen varias formas de inestabilidad que corresponde al fallo de la cuaderna como conjunto alma-ala (tipo C), aunque raramente ocurre si se dimensionan según las recomendaciones anteriores.

7.6.2 FALLO POR PLASTIFICACIÓN DEL FORRO

Este fallo se produce por la plastificación local de la plancha que forma el forro.

Cuando las cargas hidrostáticas se van elevando, las tensiones que el material soporta lo hacen igualmente, de forma casi proporcional. Llega un punto en que se alcanza el límite proporcional de elasticidad del material en alguna zona de la estructura. Si se continúan aumentando las cargas, se puede llegar al límite de fluencia y cuando las zonas en este régimen son lo suficientemente amplias, la estructura se deforma de modo característico al perder su rigidez inicial (ver figura 12).

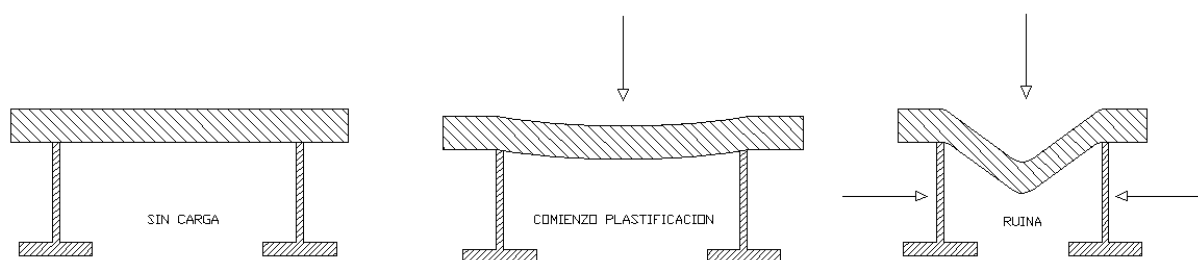


Figura 12: Evolución del fallo por plastificación del forro.

Limitándonos al caso concreto de un cilindro reforzado por cuadernas regularmente espaciadas, sometidas a una presión exterior creciente, se tiene que los puntos más cargados por tensiones son los situados bien en el centro de las claras, parte exterior del forro, o bien por los puntos de contacto cuaderna forro, por la parte interior del forro.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



En estructuras cilíndricas de acero, una vez alcanzado el límite de proporcionalidad, si está cercano al de fluencia, las zonas inelásticas se propagan rápidamente, entrando en plastificación y posteriormente en ruina con moderados incrementos de presión.

Una forma de reducir o anular la creación de una rotura en el centro de las claras, es mediante el montaje de longitudinales entre las cuadernas con poca separación entre sí, soldadas al forro. Con ello se anula la inercia longitudinal de la plancha entre cuadernas y permite retrasar el colapso, en este modo, de la estructura. Evidentemente esto supone mayor peso de la misma y una mayor complejidad constructiva, por lo que su uso sólo está justificado para presiones superiores a 100 bares (1000 m de cota).

Es el modo más deseable de destrucción, ya que indica que la estructura ha desarrollado todo su potencial.

7.6.3 FALLO POR INESTABILIDAD DEL FORRO ENTRE CUADERNAS

Este tipo de fallo se identifica por la creación de lóbulos o abultamientos, alternados hacia dentro y hacia fuera, repartidos circunferencialmente, en la franja del forro comprendida entre dos cuadernas. Las cuadernas no se deforman apenas, limitándose a tomar una torsión alternada, en fase y a demanda del forro, ver figura.

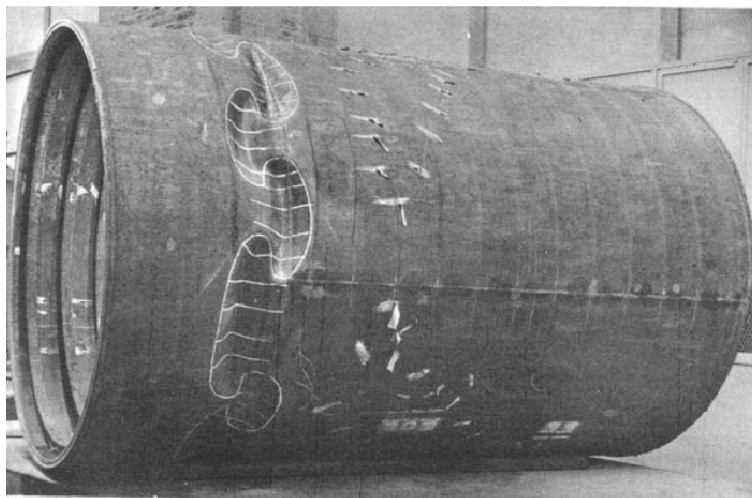


Figura 13: Pandeo por inestabilidad del forro entre cuadernas. Fuente: Capítulo 7.Casco y estructura. P.Sosa

Cuando este fenómeno sucede en varias claras contiguas, se produce un desfase de media longitud de onda de los abultamientos de una clara y la contigua. Por consiguiente, las deformaciones son anti-simétricas respecto a las cuadernas situándose sobre ellas el punto de inflexión de la ondulación longitudinal y permaneciendo estas circulares.

El número de ondas en sentido circunferencial es de 8 a 10, como mínimo, siendo la longitud de las simi-ondas muy similar a la clara entre cuadernas.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



El colapso sobreviene como consecuencia de los grandes esfuerzos y momentos de flexión que aparecen en las planchas del forro provocados por esta deformación lobular asimétrica, lográndose instantáneamente, el aplastamiento de la estructura completa.

Este tipo de fallo suele ocurrir en casos con forros de poco espesor y cuadernas relativamente fuertes y separadas. En los sumergibles actuales, que precisan unos mayores espesores, al ser las cotas operativas mayores, por lo tanto, éste no es un modo crítico usual.

7.6.4 FALLO POR INESTABILIDAD GENERAL

Modo de colapso en el que participa todo el anillo. El elemento determinante es la inercia de las cuadernas y su circularidad.

Si las cuadernas, a pesar de estar correctamente distanciadas y proporcionadas en sus elementos constructivos, tienen un módulo resistente reducido, puede ocurrir que no puedan mantener la circularidad, al irse aumentando progresivamente la presión exterior e ir recibiendo cargas cada vez mayores procedentes del forro.

Cuando el anillo está limitado por dos cuadernas muy reforzadas o por mamparos, la zona del forro y cuadernas próximas a los mismos se encuentran relativamente más rígidas frente a la ovalización que las zonas centrales, comprendidas entre los mamparos. Por este motivo, cuando se produce una inestabilidad, ésta comienza por las cuadernas más alejadas a los extremos.

Puesto que las cuadernas van rígidamente unidas al forro, el conjunto forro-cuadernas se deforma simultáneamente, arrastrando a los tramos contiguos del forro y sus respectivas cuadernas. Este fenómeno se propaga hacia los mamparos, que por su enorme rigidez, frente a la ovalización, se deforman muy poco y permanecen casi circulares. Es decir, el mamparo o punto resistente no permanece plano, sino que toma forma de festón, aunque apenas se desplace longitudinalmente, lo que favorece la inestabilidad general del anillo.

Por esta causa entre otras, los mamparos o puntos fuertes se ven dotados de virolas, fajas o elementos rigidizantes en su periferia.

Además, para una presión exterior constante, es muy importante tener una circularidad inicial o de construcción de las cuadernas y el forro lo más perfecta posible, con vistas a evitar o retrasar la inestabilidad general. Esto hace que en la actualidad las cuadernas se suelen mecanizar (tornear) por el exterior para darles una figura totalmente circular.

Tras todas las manipulaciones de construcción, soldaduras, etc., pueden ocasionar que las cuadernas, inicialmente muy perfectas, se ovalicen, junto con su forro añadido. Puesto que la eliminación de estas ovalizaciones reales, puede ser muy engorrosa y cara, lo que se hace es fijar una ovalización máxima admisible (regulada por las SSCC) definida por la máxima diferencia entre dos diámetros perpendiculares entre sí.

Los cálculos se realizan suponiendo que todas las cuadernas poseen la máxima ovalización admisible y que, además, esta ovalización está orientada en el mismo sentido en todas las cuadernas, siendo este el caso más desfavorable.

En el caso de los sumergibles, como la longitud del cilindro entre mamparos es muy grande, superiores a 3 o 4 diámetros, el modo de pandeo general más propenso a ocurrir es el de dos ondas ($n = 2$, elipse). Siendo para longitudes menores de tres ondas ($n = 3$), (ver figura 14).

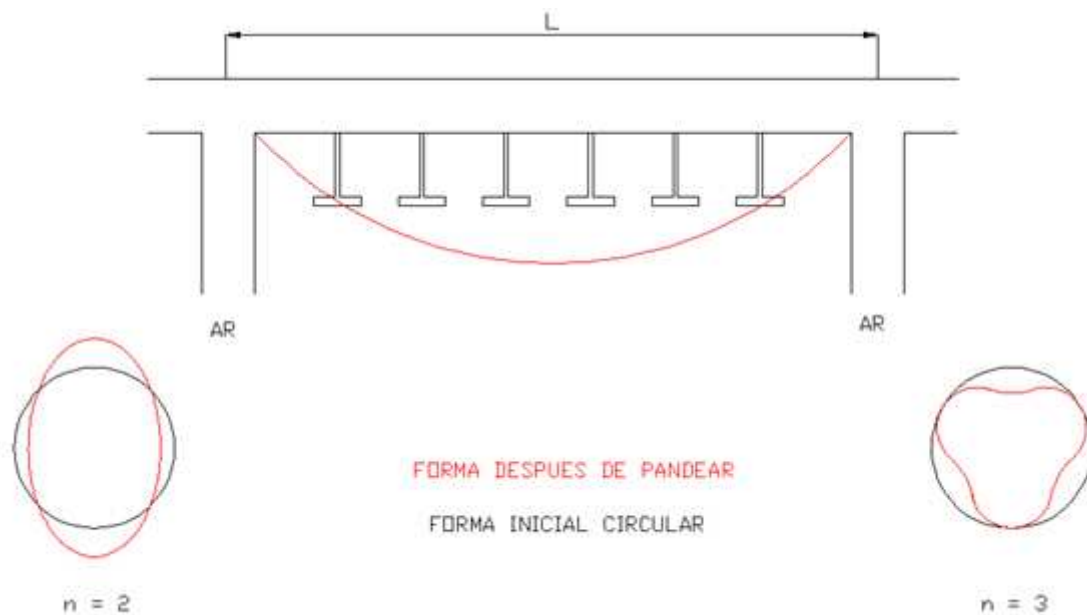


Figura 14: Pandeo general de un anillo reforzado para 2 y 3 nodos.

Por encima de este número de ondas es muy raro que se tengan presiones críticas que compitan, es decir, que sean inferiores a las correspondientes a $n=2$ y $n=3$ ondas. De todos modos, las SSCC realizan los cálculos para un número de nodos $n=5$.

También hay que evitar la concentración de tensiones, evitando puntos duros provenientes del montaje y soldadura de polines o tanques muy robustos sobre zonas del casco impidiendo el libre movimiento contracción-expansión de éste. Ello crea fatiga y el consiguiente agrietamiento con el tiempo.



7.7 PLANO DEL CASCO RESISTENTE

Cumpliendo con todos los parámetros constructivos marcados en los apartados anteriores (7.1 – 7.6), se ha realizado el plano de disposición general del casco resistente del sumergible “Plano del Casco Resistente” (Anexo V), donde en la siguiente figura se puede ver una imagen del mismo.

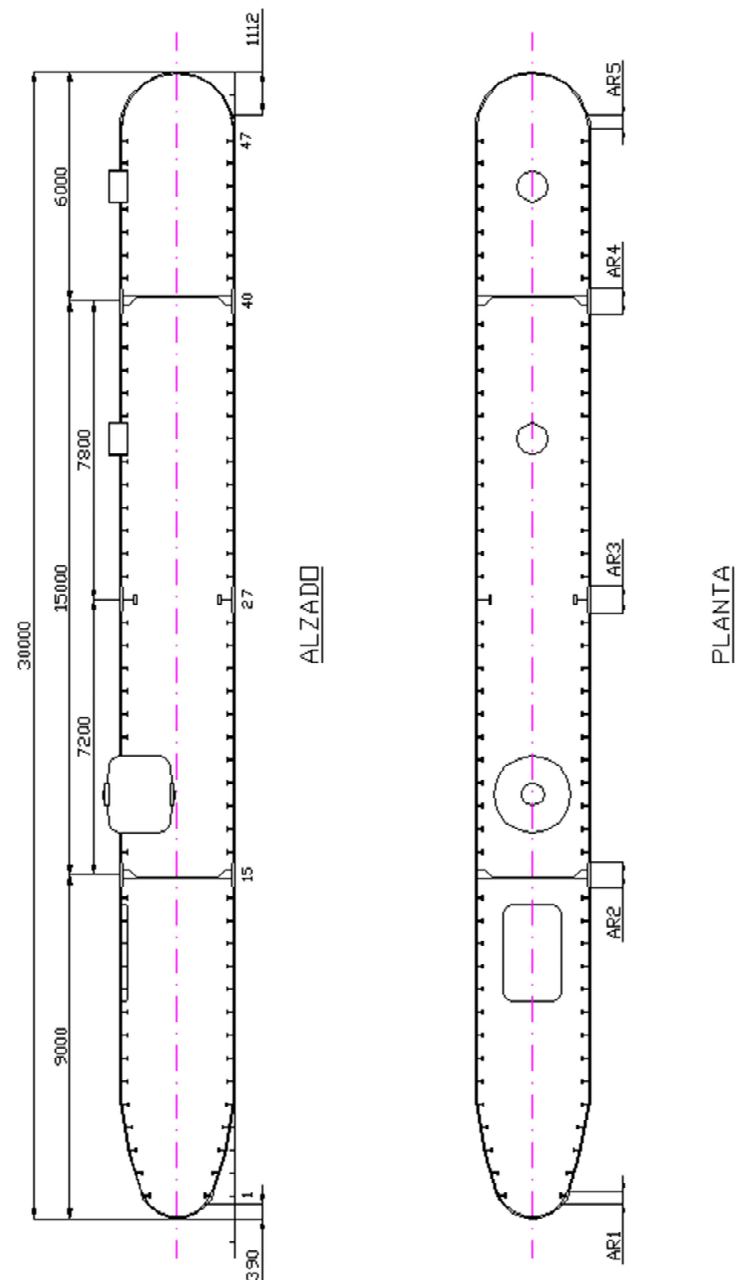
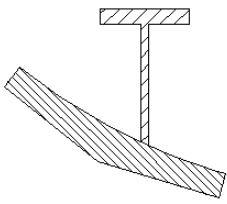
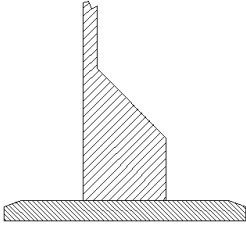
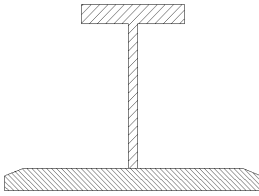
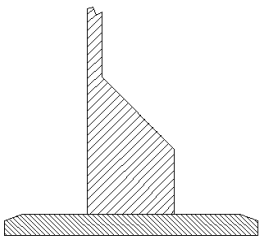
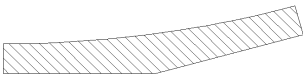


Figura 15: Plano del Casco Resistente.

En este plano ya se define la ubicación de los anillos resistentes (AR) y su configuración, siendo las principales características las señaladas en la siguiente tabla.

ELEMENTO	CONFIGURACIÓN	UBICACIÓN
AR1 	Anillo + cuaderna	Cuaderna 1
AR2 	Mamparo + Virola	Cuaderna 15
AR3 	Bulárcama + Virola	Cuaderna 27
AR4 	Mamparo + Virola	Cuaderna 40
AR5 	Anillo	Cuaderna 47

8. INTRODUCCIÓN AL CÁLCULO



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



8.1 INTRODUCCIÓN

En este apartado se detalla la obtención de datos necesarios para la realización del cálculo del casco resistente de acuerdo con la Sociedad de Clasificación Germanischer Lloyd (GL) en la norma "Rules for Classification and Construction. I, Ship Technology. Part 5, Underwater Technology. Chapter 2, Manned Submersibles. (Edition 2009)". (Ref. [1]).

Para cumplir con el objetivo de este proyecto se han propuesto unos escantillones iniciales basados en los criterios constructivos citados durante el desarrollo de los apartados 6 "Formas del casco" y 7 "Estructura" de este documento, los cuales, se irán depurando hasta alcanzar los resultados óptimos.

Entendiendo como óptimo, aquellos escantillones que cumpliendo todos los requisitos de la norma, presenten el menor peso estructural de material, y por tanto, el menor precio constructivo de acero.

Muchos de los datos iniciales obedecen a imperativos de arquitectura naval, siendo, nosotros como ingenieros, los que tenemos que diseñarlos para el cumplimiento de la norma.

Otros datos son extraídos de los anexos de la norma GL (Ref. [1]):

- Anexo A – Calculation of the Pressure Hull.
- Anexo B – Manufacturing Tolerances for the Pressure Hull.

El último grupo de datos se obtienen de referencias que realiza GL a otras normativas propias, por ejemplo:

- GL "II, Materials and Welding, Part 1, Metallic Materials", (Ref. [4]).
- GL "III, Naval Ship Technology. Part 2, Sub-Surface Ships", (Ref. [5]).
- GL "III, Naval Ship Technology. Part 1, Surface Ships", (Ref. [6]).

Obtenidos de lo anteriormente dispuesto, se tomarán como datos fijos en el proceso de cálculo: tipo de material, clara entre cuadernas, espaciado entre puntos fuertes (AR), coeficientes de seguridad y tolerancias constructivas, es decir, los valores a optimizar serán el espesor del casco resistente y las dimensiones de las cuadernas y la bulárcama (escantillones).

8.2 DATOS FIJOS DEL PROCESO DE CÁLCULO

8.2.1 MATERIAL

Los aceros laminados o forjados y las fundiciones de acero son normalmente los materiales más utilizados para la fabricación del casco resistente. Otro tipo de aceros, por ejemplo, los inoxidables austeníticos, también pueden ser usados siempre que se presenten a GL para su examen y aprobación. El uso de materiales frágiles, tales como la fundición gris, no están permitidos.

En la siguiente tabla se pueden comprobar los materiales aprobados por la norma para la construcción del casco resistente.

Product type	Grade of material	GL Rules, II – Materials and Welding, standard or specification
Plates	Normalized and heat treated fine grained steels and pressure vessel steels with characteristics according to B.3.	Part 1, Chapter 2, Section 1, B., D., E., F. EN 10028-3, -6
Ends	Normalized and heat treated fine grained steels and pressure vessel steels with characteristics according to B.3.	Part 1, Chapter 2, Section 6, A.
Profiles and bars	General-purpose shipbuilding and structural steels, provided these are killed, also fine-grained structural steels with characteristics according to B.3.	Part 1, Chapter 2, Section 1, B. and C., EN 10025-2, -3, -4, -6, EN 10028-3, -5, -6
Pipes	Seamless and welded ferritic steel pipes with characteristics according to B.3.	for wall thickness ≤ 20 mm: Part 1, Chapter 2, Section 2, B., 20 mm < wall thickness ≤ 40 mm: Part 1, Chapter 2, Section 2, D.
Forgings	Forgings, pressure vessels and piping with characteristics according to B.3.	Part 1, Chapter 2, Section 3, E.
Steel castings	Steel castings, pressure vessels and piping with characteristics according to B.3.	Part 1, Chapter 2, Section 4, D. and E. EN 10213
Bolts and nuts	Unalloyed or alloy steel bars with characteristics defined in B.3.	Part 1, Chapter 2, Section 6, C., ISO 898: Strength class 5.6, 8.8, ISO 3506-1 and -2
Viewports	Acryl glass panes	Annex C to these Rules

Siendo la norma GL “II – Materials and Welding, Part 1 – Metallic Materials, Chapter 2, Section 1, B. (Ref. [4]) la que define sus propiedades mecánicas y su composición química.

De los cuatro tipos de acero aprobados:

- B. Normal and Higher Strength Hull Structural Steel.
- D. High-Strength for Welded Structures.
- E. Steel for Steam Boilers and Pressure Vessels.
- F. Steels for Cargo Tanks.

Se selecciona el tipo “D” ya que la elevación del límite elástico del material utilizado ($420 - 690 \text{ N/mm}^2$) nos permitirá reducir las secciones del casco resistente, y consecuentemente la disminución del peso



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



estructural del sumergible. Además, en este proyecto (apartado 8.5), se realiza una comprobación con un acero del tipo “B”, para confirmar la reducción de peso de la estructura.

El material elegido es acero **GL-F 690** templado y revenido (bonificado) de hasta 70 mm de espesor, que presenta las siguientes características:

- Composición química (%):

Acero GL-F 690	
C _{max}	0.18
Mn _{max}	1.70
Si _{max}	0.55
P _{max}	0.025
S _{max}	0.025
N _{max}	0.020

- Propiedades mecánicas:

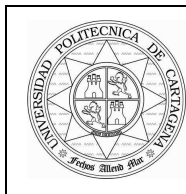
Acero GL-F 690				
Límite elástico	Resistencia Tracción	Alargamiento	Resistencia impacto	
690 N/mm ²	770 – 940 N/mm ²	14 - 16 %	long.	transv.
			69 J	46 J

- Características generales para el proceso de cálculo:

Peso específico	ρ	7850	Kg/m ³
Módulo elástico de Young	E	206000	N/mm ²
Coefficiente de Poisson	ν	0,3	

8.2.2 GEOMETRIA DE LA ESTRUCTURA

La geometría está definida en el Plano del Casco Resistente (Anexo V), pudiendo ver en la siguiente figura una imagen del mismo con las cotas entre anillos resistentes necesarias para realizar los cálculos.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



Estas cotas son necesarias para los cálculos del apartado F4 “Proof of the collapse pressure for the general instability under consideration of the web frame” en el Anexo A de la norma GL (Ref. [1]).

Se ha elegido el cuerpo de popa como zona de estudio ya que es el que presenta una mayor eslora entre sus puntos fuertes, tal y como indica la norma.

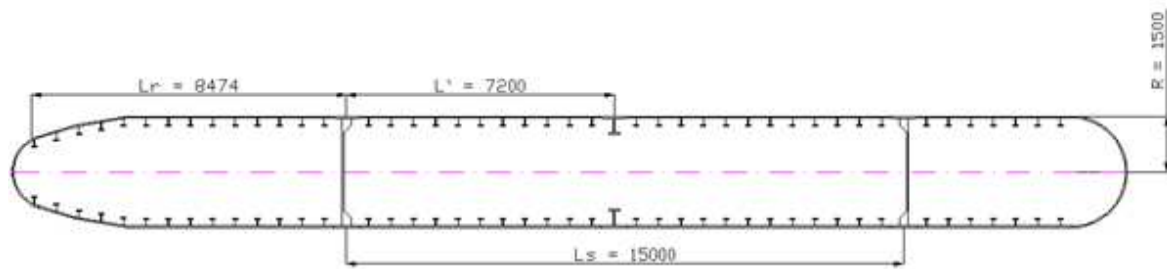


Figura 16: Estructura general del sumergible.

Las dimensiones principales utilizadas se detallan en la siguiente tabla:

Radio del casco resistente	R	1500 mm
Clara entre cuadernas	L_F	600 mm
Longitud de la zona de estudio	L_r	8474 mm
Longitud de la zona adyacente a la de estudio	L'	7200 mm
Longitud máxima entre mamparos	L_s	15000 mm
Numero de bulárcamas	1	
Número de mamparos resistentes	2	

8.2.3 TOLERANCIAS CONSTRUCTIVAS

Las tolerancias constructivas que se han seguido para la realización de los cálculos dentro de cada apartado, son las siguientes:

- F4 - Proof of the collapse pressure for the general instability under consideration of the deep frame.

La falta de circularidad máxima permitida es definida en el Anexo B “Manufacturing Tolerances for the Pressure Hull. B.” de la norma de GL aplicada (Ref. [1]), y se fija en un valor de $\pm 0.2\%$ del diámetro del casco resistente.

Este valor depende de la tecnología constructiva de cada astillero, dato del que no disponemos, por tanto, a la hora de realizar los cálculos utilizaremos el valor máximo permitido.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



Máxima falta de circularidad permitida del casco resistente	W_0	6 mm
---	-------	------

La medición del casco resistente para comprobar la circularidad se puede hacer por el interior o por el exterior. Se llevará a cabo en 24 puntos distribuidos lo más uniformemente posible en toda la circunferencia de la estructura. Los resultados obtenidos se han de presentar a GL para su examen y aprobación.

- F5 - Proof of the collapse pressure for tripping of frames.

El tripping (vuelco de las cuadernas) está muy influenciado por los parámetros de tolerancia constructiva, tal y como vimos en el apartado 7.6 “Modos de fallo” de este documento.

Estas tolerancias son definidas en el Anexo B “Manufacturing Tolerances for the Pressure Hull. D, 2.” de la norma de GL aplicada (Ref. [1]). Donde las siguientes tolerancias son los valores máximos que pueden cumplirse:

Tolerancias de recepción de los perfiles:

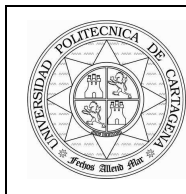
Ancho del ala	b_f	0% a + 4.5%
Espesor del ala	S_f	0 mm a + 3 mm
Espesor del alma	sw	0 mm a + 3 mm

Tolerancias constructivas en cuadernas:

Espaciado de las cuadernas	L_f	$\pm 1 \%$
Excentricidad entre alma y ala	u_{ex}	2 % de la altura de la cuaderna
Inclinación del alma	Θ	$\pm 2^\circ$
Posición del pie respecto al plano de referencia	d	+ 4 mm

Tolerancias constructivas en la bulárcama:

Excentricidad entre alma y ala	u_{ex}	2 % de la altura de la bulárcama
Inclinación del alma	Θ	$\pm 2^\circ$
Posición del pie respecto al plano de referencia	d	± 6 mm



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



8.2.4 COEFICIENTE (S_2) DE LA PRESIÓN DE COLAPSO

La profundidad nominal de buceo (NDD) es la profundidad de inmersión sin restricciones del sumergible (500 m). La Germanischer Lloyd (GL) (Ref. [1]) indica que la presión nominal de buceo (NDP) para esta profundidad, se obtiene multiplicando el valor de la profundidad nominal de buceo (NDD) por 0.1 (bar/m).

La profundidad de buceo de colapso (CDD) es la profundidad máxima absoluta de buceo del Sumergible. La presión de buceo de colapso (CDP) es la presión a la cual el casco resistente puede colapsar bajo una carga en unos pocos segundos.

El coeficiente S_2 de la presión de buceo de colapso (CDP) se elige de acuerdo a la Tabla 4.1 de la Sección 4 “Design Loads” de GL (Ref. [1]), y se representa como la división entre la presión de buceo de colapso (CDP) y la presión nominal de buceo (NDP).

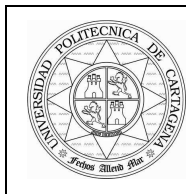
Nominal diving pressure NDP [bar]	5 ¹	10	20	30	40	50	≥ 60
Test diving pressure / nominal diving pressure $S_1 = \text{TDP} / \text{NDP}$ ^{3,4}	1,70	1,40	1,25	1,20	1,20	1,20	1,20
Collapse diving pressure / nominal diving pressure $S_2 = \text{CDP} / \text{NDP}$	3,20	2,40	2,00	1,87 ²	1,80 ²	1,76 ²	1,73 ²
¹ Minimum nominal diving pressure 5 bar ² Minimum value $S_2 = 2$ for operations in water depth > nominal diving depth ³ In the range NDP = 5 30 bar is valid $S_1 = 3 / \text{NDP} + 1,1$ ⁴ for pressure tests with the factor > 1,5 it has to be observed, that all parts of the system, like acrylic windows, are designed for TDP ⁵ In the range NDP = 5 60 bar is valid $S_2 = 8 / \text{NDP} + 1,6$							

Por tanto, para una NDP de 50 bares el valor del coeficiente S_2 es:

Coeficiente de la presión de colapso	S_2	1.76
Profundidad nominal de buceo	NDD	500 m
Profundidad de colapso	CDD	880 m
Presión de buceo de colapso	CDP	8.92 N/mm ²

Donde el coeficiente de seguridad S_2 se basa en las siguientes incertidumbres:

- Influencias no tenidas en cuenta por los cálculos del procedimiento.
- Influencias como consecuencia de los errores de fabricación (taras de los materiales, errores de soldadura, tensiones residuales, etc...).
- Influencias durante la operación (corrosión, etc.).
- Influencia de las características del paso del tiempo del material.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



8.2.5 ADICIÓN DE ESPESOR POR CORROSIÓN (t_K)

Sobre los valores de los escantillones del forro y las cuadernas se requiere la adición de un espesor por corrosión (t_K) al espesor teórico de cálculo.

Esto se contempla en la Sección 3 “Principles for Design and Construction” de la GL (Ref. [5]), donde los valores de espesor añadido por corrosión (t_K) son los siguientes:

- $t_K = 0,5 \text{ mm}$ in general
- $t_K = 0,7 \text{ mm}$ for lubrication oil, gas oil or equivalent tanks
- $t_K = 1,0 \text{ mm}$ for water ballast and wastewater tanks
- for special applications t_K shall be agreed with GL
- For all elements of the submarine's structure which are forming a boundary of tanks, the t_K values for tanks have to be considered.

Para realizar los cálculos se ha seleccionado la condición más desfavorable, es decir, suponiendo que todo el forro y las cuadernas están en contacto con agua de lastre, tomando t_K el valor:

Espesor añadido por corrosión	t_K	1 mm
-------------------------------	-------	------

8.2.6 CONSTANTES FÍSICAS

Como requisito mínimo, el diseño, selección y disposición de todas las máquinas, instrumentos y equipamiento que se encuentran a bordo de los sumergibles están obligados a ajustarse a las condiciones ambientales que se detallan a continuación. Esto se contempla en la Sección 3 “Principles for Design and Construction. B” de la GL (Ref. [5]).

- Agua de mar: Los cálculos se basan en agua de mar dentro del rango de temperaturas de -2°C a $+32^\circ\text{C}$, con un contenido en sal del 3.5% y una densidad de 1028 Kg/m^3 . Para la conversión de profundidad a presión se aplicará un valor de 0.101 bar/m .
- Estados del mar: Los sumergibles son diseñados para aceleraciones verticales descendentes de $2g \text{ rms}$ y ascendentes de $1g \text{ rms}$. También se diseñan para $1g \text{ rms}$ en sentido transversal y longitudinal. ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$).



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



Las constantes físicas usadas en los cálculos son:

Densidad del agua del mar	ρ	1028 Kg/m ³
Aceleración de la gravedad	g	9.81 m/s ²

8.3 INCERTIDUMBRES DEL PROCESO DE CÁLCULO

Tras un laborioso proceso de estudio y afinamiento basado en la programación en Excel de los requisitos de la norma GL (Ref. [1]), y realizando un proceso iterativo de cálculo verificando los cuatro modos de fallo que establece la norma, se han conseguido los siguientes resultados óptimos:

- Dimensiones del forro:

Espesor con adición por corrosión (t_k)	s_r	26 mm
---	-------	-------

- Dimensiones de las cuadernas:

	Altura del alma	h_w	100 mm
	Espesor del alma	S_w	15 mm
	Anchura del ala	b_f	70 mm
	Espesor del ala	S_f	25 mm
	Longitud de la plancha asociada	L_{eff}	300 mm
	Espesor de la plancha asociada	s	25 mm

- Dimensión de la bulárcama:

	Altura del alma	h_w	265 mm
	Espesor del alma	S_w	25 mm
	Anchura del ala	b_f	180 mm
	Espesor del ala	S_f	40 mm
	Longitud de la plancha asociada	L_{eff}	378 mm
	Espesor de la plancha asociada	s	40 mm



8.4 PLANO DE LA ESTRUCTURA EN 3D DEL CASCO RESISTENTE

En la siguiente figura se puede apreciar la ubicación de los anillos resistentes (marcados en verde) y la posición de los mamparos resistentes y la bulárcama (marcados en magenta). También se aprecia la disposición de todas las cuadernas (azul) y la posición del c.d.g (esfera amarilla).

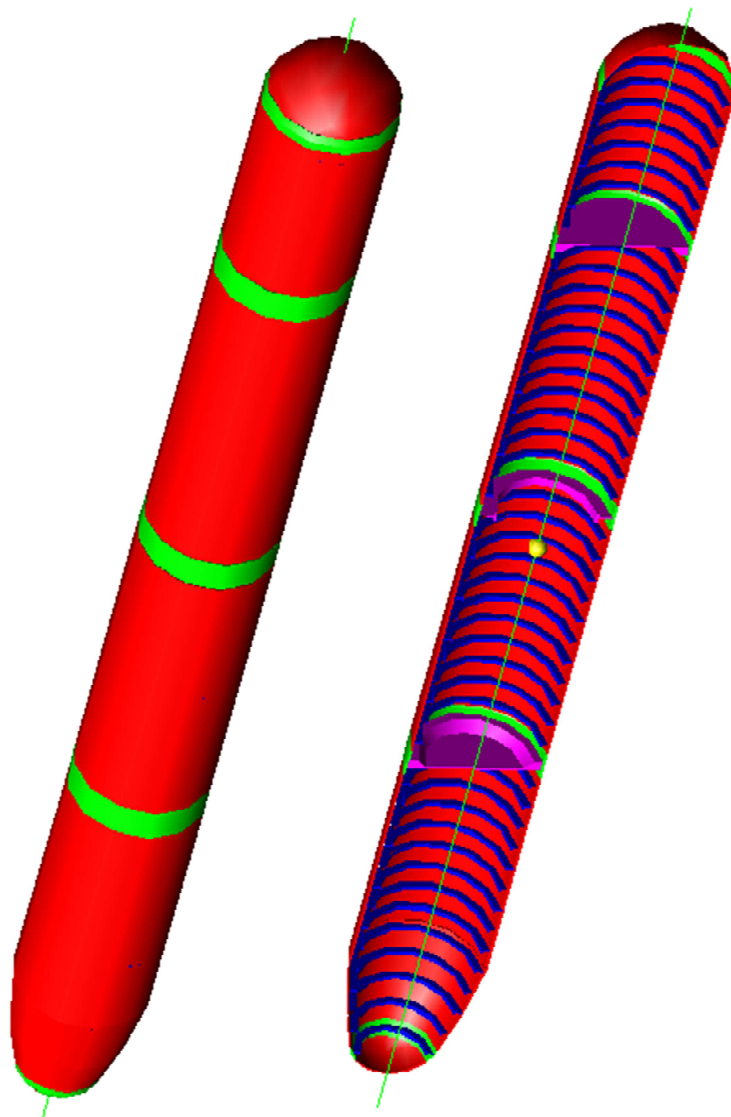


Figura 17: Estructura 3D del casco resistente.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



Características del casco resistente

MATERIAL	Acero GL-F 690
PESO ESPECÍFICO	7850 Kg/m ³
VOLUMEN	9.363 m ³
PESO	73.00 t
C.d.G	15362.76 mm
Lcg	+ 1.024 % de L/2

8.5 COMPARATIVA DE ACEROS

Tal y como se indicó en la sección 8.2 “Datos fijos del proceso de cálculo”, en este apartado se realiza una comprobación con un acero del tipo B (GL-E36 - Normal and Higher Strength Hull Structural Steel), para confirmar y evaluar la reducción de peso de la estructura, que conlleva a la selección del acero tipo D. Presentando las siguientes características:

- Composición química:

Acero GL-E36		
C _{max}	0.18	
Mn	0.90 – 1.60	
Si _{max}	0.50	
P _{max}	0.035	
S _{max}	0.035	
Al	0.015	
Nb _{max}	0.02 – 0.05	Total 0.12 _{max}
V	0.05 – 0.10	
Ti _{max}	0.02	
Cu _{max}	0.30	
Cr _{max}	0.20	
Ni _{max}	0.40	
Mo _{max}	0.08	
C _{eq}	0.38 para t ≤ 50 mm	

- Propiedades mecánicas:

Acero GL-E36				
Límite elástico	Resistencia Tracción	Alargamiento	Resistencia impacto	
355 N/mm ²	490 – 630 N/mm ²	21 %	long.	transv.
			34 J	24 J

- Características generales para el proceso de cálculo:

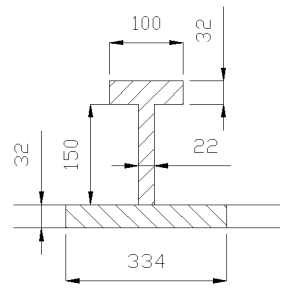
Peso específico	ρ	7850	Kg/m ³
Módulo elástico de Young	E	206000	N/mm ²
Coeficiente de Poisson	ν	0,3	

Tras proceso de cálculo iterativo, similar al llevado a cabo para el acero de tipo “D” en las secciones previas, se han obtenido los siguientes resultados óptimos:

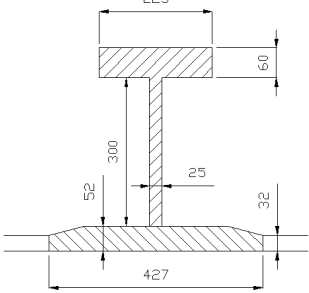
- Dimensiones del forro:

Espesor con adición por corrosión (t_k)	h_r	32 mm
---	-------	-------

- Dimensiones de las cuadernas:

	Altura del alma	h_{st}	150 mm
	Espesor del alma	t_{st}	22 mm
	Anchura del ala	b_G	100 mm
	Espesor del ala	t_G	32 mm
	Longitud de la plancha asociada	L_{eff}	334 mm
	Espesor de la plancha asociada	h	32 mm

- Dimensión de la bulárcama:

	Altura del alma	h_{st}	300 mm
	Espesor del alma	t_{st}	25 mm
	Anchura del ala	b_G	225 mm
	Espesor del ala	t_G	60 mm
	Longitud de la plancha asociada	L_{eff}	427 mm
	Espesor de la plancha asociada	h	52 mm

Comparativa entre aceros.

MATERIAL	Acero GL-F 690	Acero GL-E36
PESO ESPECÍFICO	7850 Kg/m ³	7850 Kg/m ³
VOLUMEN	9.363 m ³	15.191 m ³
PESO	73.000 t	119.248 t
C.d.G	15362.76 mm a Pp	15316 mm a Pp
Lcg	+ 1.024 % de L/2	+ 1.021 % de L/2

Como se puede apreciar en la tabla comparativa superior, la elección de un acero con alto límite elástico respecto a un acero normal, supone un porcentaje de reducción de peso de la estructura de 39%. Representando este valor un ahorro de 46 toneladas en acero estructural.

9. CÁLCULO (RESULTADOS)



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



9.1 INTRODUCCIÓN

El cálculo estructural se realiza para las dimensiones representadas en el apartado 8.3 “Incertidumbres del proceso de cálculo” y el acero **GL-F 690** siguiendo el procedimiento descrito en el Anexo A del documento de la Germanischer Lloyd “Rules for Classification and Construction. I, Ship Technology. Part 5, Underwater Technology. Chapter 2, Manned Submersibles. (Edition 2009)”. (Ref. [1]), adjuntado en este documento como anexo I.

Siendo en el apartado F “Calculation”, donde se desarrollan los siguientes puntos de estudio de la estructura:

- F1 - Calculation of stresses in a uniformly stiffened cylinder or cone as basis for the calculation of the collapse pressure.
- F2 - Calculation of the collapse pressure for the asymmetric interstiffener buckling of the shell in uniformly stiffened section of the pressure hull.
- F3 - Calculation of the collapse pressure for the symmetric interstiffener buckling of the shell in uniformly stiffened section of the pressure hull.
- F4 - Proof of the collapse pressure for the general instability under consideration of the web frame.
- F5 - Proof of the collapse pressure for tripping of frames.
- F6 – Spherical shells and dished ends.
- F7 – Penetrations of the pressure hull and discontinuities.

Y el sumario de esfuerzos los presentados en la siguiente tabla:

Stresses in the cylindrical shell						
Types of stresses	At the frame			In the middle of the field		
	Circumferential	Equivalent	Axial	Circumferential	Equivalent	Axial
Membrane stress	$\sigma_{\phi,F}^m$ (A19)		$\sigma_{x,F}^m$ (A17)	$\sigma_{\phi,M}^m$ (A18)		$\sigma_{x,M}^m$ (A17)
Membrane equivalent stress		$\sigma_{v,F}^m$ (A14)			$\sigma_{v,M}^m$ (A14)	
Bending stresses	$\sigma_{\phi,F}^b$ (A23)		$\sigma_{x,F}^b$ (A21)	$\sigma_{\phi,M}^b$ (A22)		$\sigma_{x,M}^b$ (A20)
Normal stress outside	$\sigma_{\phi,F}^m + \sigma_{\phi,F}^b$ (A19) + (A23)		$\sigma_{x,F}^m + \sigma_{x,F}^b$ (A17) + (A21)	$\sigma_{\phi,M}^m + \sigma_{\phi,M}^b$ (A18) + (A22)		$\sigma_{x,M}^m + \sigma_{x,M}^b$ (A17) + (A20)
Equivalent normal stress outside		$\sigma_{v,F,o}^{m+b}$ (A14)			$\sigma_{v,M,o}^{m+b}$ (A14)	
Normal stress inside	$\sigma_{\phi,F}^m - \sigma_{\phi,F}^b$ (A19) - (A23)		$\sigma_{x,F}^m - \sigma_{x,F}^b$ (A17) - (A21)	$\sigma_{\phi,M}^m - \sigma_{\phi,M}^b$ (A18) - (A22)		$\sigma_{x,M}^m - \sigma_{x,M}^b$ (A17) - (A20)
Equivalent normal stress inside		$\sigma_{v,F,i}^{m+b}$ (A14)			$\sigma_{v,M,i}^{m+b}$ (A14)	
Remark The numbers in brackets represent the numbers of the formulas to be applied.						

Para el diseño del puerto hemisférico panorámico de observación de plástico acrílico de proa, se tendrá en cuenta el mismo documento de GL “Rules for Classification and Construction. I, Ship Technology. Part 5, Underwater Technology. Chapter 2, Manned Submersibles. (Edition 2009)”. (Ref. [1]), adjuntado



en este documento como anexo II. Siendo el Apéndice C “Acrylic Windows” el que dictamina los criterios de cálculo.

Tomando como geometría estructural básica las medidas marcadas en la siguiente figura:

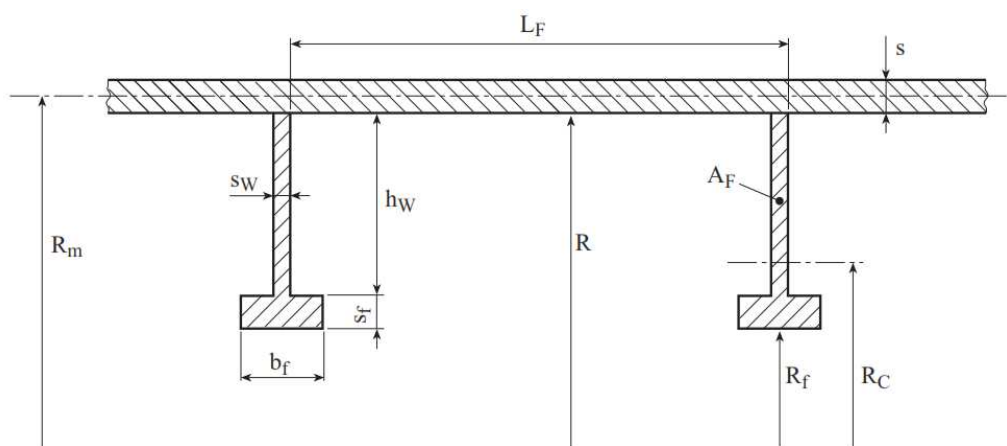


Figura 18: Parámetros básicos geométricos de cálculo.

9.2 F1 - STRESSES IN A UNIFORMLY STIFFENED CYLINDER OR CONE AS BASIS FOR THE CALCULATION OF THE COLLAPSE PRESSURE

Los cálculos se han realizado de acuerdo al apartado F1 del Anexo A del documento de la Germanischer Lloyd. “Rules for Classification and Construction. I, Ship Technology. Part 5, Underwater Technology. Chapter 2, Manned Submersibles. (Edition 2009)”. (Ref. [1]).

En este apartado se calcula el esfuerzo básico que ha de resistir la estructura del casco resistente del sumergible por el mero hecho de estar sumergido a una determinada profundidad, siendo ésta, la profundidad de buceo de colapso (CDD). A esta profundidad le corresponde una presión de colapso (CDP) de 8,92 N/mm² tal y como se describe en el apartado 8.2.4 de este documento.

Esta solicitación es de tipo hidrostático, donde la carga permanece siempre normal a la superficie sobre la que actúa, siendo constante su magnitud y dirección en la cota que estemos considerando. Por ello se calcula para la profundidad de buceo de colapso (CDD).

Para el cálculo de las tensiones de la parte cónica del casco, las fórmulas son modificadas mediante el ángulo medio (α). Se calculan las medidas equivalentes de radio medio, clara entre cuadernas y espaciado interno entre cuadernas, dividiendo los valores entre “ $\cos(\alpha)$ ”. Las dimensiones de las cuadernas tienen que ser multiplicadas por la relación de radios, radio medio del forro/ radio medio al centroide de la cuaderna ($R_m/R_{m.sp}$).

En este apartado no ha de cumplirse ningún requisito, porque como ya indicamos anteriormente, sólo se calculan los esfuerzos básicos producidos por la columna de agua que está soportando el sumergible. Estos esfuerzos son necesarios para el resto de apartados.

Los esfuerzos básicos obtenidos para las cuadernas y el forro del cuerpo cilíndrico se representan en la tabla F1.1:

Circumferential stress in the unstiffened pressure hull (A13)	σ_o	-530.53 N/mm ²
Radial displacement midway between the frames (A15)	W_M	-3.13 mm
Radial displacement at the frames (A16)	W_F	-2.17 mm
Average membrane stress in longitudinal direction (A17)	σ^m_x	-265.27 N/mm ²
Membrane stress in circumferential direction midway between de frames (A18)	$\sigma^m_{\phi,M}$	-512.52 N/mm ²
Membrane stress in circumferential direction at the frames (A19)	$\sigma^m_{\phi,F}$	-380.69 N/mm ²
Bending stress in longitudinal direction in the middle between frames (A20)	$\sigma^b_{x,M}$	-116.48 N/mm ²
Bending stress in longitudinal direction at the frames (A21)	$\sigma^b_{x,F}$	294.14 N/mm ²
Bending stress in circumferential direction midway between the frames (A22)	$\sigma^b_{\phi,M}$	-34.94 N/mm ²
Bending stress in circumferential direction at the frames (A23)	$\sigma^b_{\phi,F}$	88.24 N/mm ²
Circumferential stress follows from the radial displacement (A24)	$\sigma^m_{\phi,Fw}$	-301.11 N/mm ²

Tabla F1.1: Esfuerzos básicos del cuerpo cilíndrico.

Los esfuerzos básicos obtenidos para la bulárcama se representan en la tabla F1.2:

Circumferential stress in the unstiffened pressure hull (A13)	σ_o	-329.91 N/mm ²
Radial displacement midway between the frames (A15)	W_M	-1.56 mm
Radial displacement at the frames (A16)	W_F	-1.04 mm
Average membrane stress in longitudinal direction (A17)	σ^m_x	-164.96 N/mm ²
Membrane stress in circumferential direction midway between de frames (A18)	$\sigma^m_{\phi,M}$	-266.97 N/mm ²
Membrane stress in circumferential direction at the frames (A19)	$\sigma^m_{\phi,F}$	-193.58 N/mm ²
Bending stress in longitudinal direction in the middle between frames (A20)	$\sigma^b_{x,M}$	-111.04 N/mm ²
Bending stress in longitudinal direction at the frames (A21)	$\sigma^b_{x,F}$	246.05 N/mm ²
Bending stress in circumferential direction midway between the frames (A22)	$\sigma^b_{\phi,M}$	-33.31 N/mm ²
Bending stress in circumferential direction at the frames (A23)	$\sigma^b_{\phi,F}$	73.81 N/mm ²
Circumferential stress follows from the radial displacement (A24)	$\sigma^m_{\phi,Fw}$	-144.10 N/mm ²

Tabla F1.2: Esfuerzos básicos en la bulárcama.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



Los esfuerzos básicos obtenidos para el casco cónico ($\alpha = 10^\circ$) se representan en la tabla F1.3:

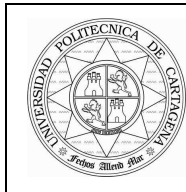
Circumferential stress in the unstiffened pressure hull (A13)	σ_o	-492.10 N/mm ²
Radial displacement midway between the frames (A15)	W_M	-2.72 mm
Radial displacement at the frames (A16)	W_F	-1.72 mm
Average membrane stress in longitudinal direction (A17)	σ^m_x	-246.05 N/mm ²
Membrane stress in circumferential direction midway between de frames (A18)	$\sigma^m_{\phi,M}$	-480.20 N/mm ²
Membrane stress in circumferential direction at the frames (A19)	$\sigma^m_{\phi,F}$	-330.82 N/mm ²
Bending stress in longitudinal direction in the middle between frames (A20)	$\sigma^b_{x,M}$	-114.71 N/mm ²
Bending stress in longitudinal direction at the frames (A21)	$\sigma^b_{x,F}$	314.12 N/mm ²
Bending stress in circumferential direction midway between the frames (A22)	$\sigma^b_{\phi,M}$	-34.41 N/mm ²
Bending stress in circumferential direction at the frames (A23)	$\sigma^b_{\phi,F}$	94.24 N/mm ²
Circumferential stress follows from the radial displacement (A24)	$\sigma^m_{\phi,Fw}$	-257.00 N/mm ²

Tabla F1.3: Esfuerzos básicos en el casco cónico (10°).

Los esfuerzos básicos obtenidos para el casco cónico ($\alpha = 17^\circ$) se representan en la tabla F1.4:

Circumferential stress in the unstiffened pressure hull (A13)	σ_o	-368.46 N/mm ²
Radial displacement midway between the frames (A15)	W_M	-1.60 mm
Radial displacement at the frames (A16)	W_F	-0.87 mm
Average membrane stress in longitudinal direction (A17)	σ^m_x	-184.23 N/mm ²
Membrane stress in circumferential direction midway between de frames (A18)	$\sigma^m_{\phi,M}$	-374.32 N/mm ²
Membrane stress in circumferential direction at the frames (A19)	$\sigma^m_{\phi,F}$	-229.49 N/mm ²
Bending stress in longitudinal direction in the middle between frames (A20)	$\sigma^b_{x,M}$	-65.49 N/mm ²
Bending stress in longitudinal direction at the frames (A21)	$\sigma^b_{x,F}$	260.84 N/mm ²
Bending stress in circumferential direction midway between the frames (A22)	$\sigma^b_{\phi,M}$	-19.65 N/mm ²
Bending stress in circumferential direction at the frames (A23)	$\sigma^b_{\phi,F}$	78.25 N/mm ²
Circumferential stress follows from the radial displacement (A24)	$\sigma^m_{\phi,Fw}$	-174.23 N/mm ²

Tabla F1.4: Esfuerzos básicos en el casco cónico (17°).



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



9.3 F2 - COLLAPSE PRESSURE FOR THE ASYMMETRIC INTERSTIFFENER BUCKLING OF THE SHELL IN UNIFORMLY STIFFENED SECTIONS OF THE PRESSURE HULL

Los cálculos se han realizado de acuerdo al apartado F2 del Anexo A del documento de la Germanischer Lloyd. "Rules for Classification and Construction. I, Ship Technology. Part 5, Underwater Technology. Chapter 2, Manned Submersibles. (Edition 2009)". (Ref. [1]).

Este apartado comienza obteniendo el valor combinado de esfuerzos " σ_v " como una extrapolación lineal de los valores calculados en el apartado anterior para la presión de colapso (CDP). Con él, se obtiene el módulo de la tangente y el módulo de la secante en función del material con el que esté construida la estructura del casco, en el caso que nos ocupa, acero ferrítico. Con estos valores calculamos la "Theoretical inelastic buckling pressure".

Como condición de cumplimiento se tiene que demostrar que la "Theoretical inelastic buckling pressure" $P_{i_{cr}}$ multiplicada por el factor de reducción " r ", es al menos igual a la presión de buceo de colapso, 8,92 N/mm², de cálculo del casco resistente.

La tabla F2.1 muestra los resultados más significativos del proceso de cálculo para el cuerpo cilíndrico:

Linear extrapolation from the value of the calculation pressure (A32)	σ_v	443.95 N/mm ²
Elastic buckling pressure (A28)	$P_{el_{cr}}$	22.59 N/mm ²
Theoretical elastic-plastic pressure (A29)	$P_{i_{cr}}$	22.59 N/mm ²
Reduction factor (A43)	r	0.75

Tabla F2.1: Resultados para cuerpo cilíndrico.

Condición de cumplimiento.

$P_{i_{cr}} * r$	>	CDP
16.94	>	8.92
CUMPLE		



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



La tabla F2.2 muestra los resultados más significativos del proceso de cálculo para el cuerpo cónico (10°):

Linear extrapolation from the value of the calculation pressure (A32)	σ_v	415.91 N/mm ²
Elastic buckling pressure (A28)	$P_{el_{cr}}$	24.143 N/mm ²
Theoretical elastic-plastic pressure (A29)	$P_{i_{cr}}$	24.143 N/mm ²
Reduction factor (A43)	r	0.75

Tabla F2.2: Resultados para cuerpo cónico (10°).

Condición de cumplimiento.

$P_{i_{cr}} * r$	>	CDP
18.11	>	8.92
CUMPLE		

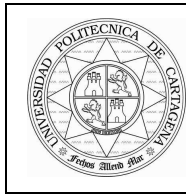
La tabla F2.3 muestra los resultados más significativos del proceso de cálculo para el cuerpo cónico (17°):

Linear extrapolation from the value of the calculation pressure (A32)	σ_v	324.19 N/mm ²
Elastic buckling pressure (A28)	$P_{el_{cr}}$	33.03 N/mm ²
Theoretical elastic-plastic pressure (A29)	$P_{i_{cr}}$	33.03 N/mm ²
Reduction factor (A43)	r	0.75

Tabla F2.3: Resultados para cuerpo cónico (17°).

Condición de cumplimiento.

$P_{i_{cr}} * r$	>	CDP
24.78	>	8.92
CUMPLE		



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



9.4 F3 - COLLAPSE PRESSURE FOR THE SYMETRIC INTERSTIFFENER BUCKLING OF THE SHELL IN UNIFORMLY STIFFENED SECTIONS OF THE PRESSURE HULL

Los cálculos se han realizado de acuerdo al apartado F3 del Anexo A del documento de la Germanischer Lloyd. "Rules for Classification and Construction. I, Ship Technology. Part 5, Underwater Technology. Chapter 2, Manned Submersibles. (Edition 2009)". (Ref. [1]).

Este apartado es análogo al descrito en el apartado anterior. Con la salvedad de que el valor de los esfuerzos combinados, es una ecuación adimensional llamada k . Como ya disponemos del módulo de la secante y del módulo de la tangente obtenidos en el apartado anterior, calculamos la "Theoretical inelastic buckling pressure".

Como condición de cumplimiento se tiene que demostrar que la "Theoretical inelastic buckling pressure" $P_{i_{cr}}$ multiplicada por el factor de reducción " r ", es al menos igual a la presión de buceo de colapso (CDP) de cálculo del casco resistente.

Siendo el factor de reducción (r), al igual que en el apartado anterior:

$$r = 1 - 0,25 e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{P_{cr}^{el}}{P_{i_{cr}}} - 1 \right)}$$

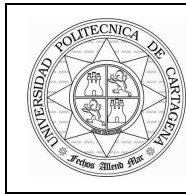
La tabla F3.1 muestra los resultados más significativos del proceso de cálculo para el cuerpo cilíndrico:

	k	1.932
Elastic buckling pressure (A44)	P_{cr}^{el}	118.29 N/mm ²
Theoretical elastic-plastic buckling pressure (A45)	$P_{i_{cr}}$	118.29 N/mm ²
Reduction factor (A55)	r	0.75

Tabla F3.1: Resultados para cuerpo cilíndrico.

Condición de cumplimiento.

$P_{i_{cr}} * r$	>	CDP
88.72	>	8.92
CUMPLE		



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



La tabla F3.2 muestra los resultados más significativos del proceso de cálculo para el cuerpo cónico (10°):

	k	1.952
Elastic buckling pressure (A44)	$P_{el_{cr}}$	153.28 N/mm ²
Theoretical elastic-plastic buckling pressure (A45)	$P_{i_{cr}}$	153.28 N/mm ²
Reduction factor (A55)	r	0.75

Tabla F3.2: Resultados para cuerpo cónico (10°).

Condición de cumplimiento.

$P_{i_{cr}} * r$	>	CDP
114.96	>	8.92
CUMPLE		

La tabla F3.3 muestra los resultados más significativos del proceso de cálculo para el cuerpo cónico (17°):

	k	2.032
Elastic buckling pressure (A44)	$P_{el_{cr}}$	393.22 N/mm ²
Theoretical elastic-plastic buckling pressure (A45)	$P_{i_{cr}}$	393.22 N/mm ²
Reduction factor (A55)	r	0.75

Tabla F3.3: Resultados para cuerpo cónico (17°).

Condición de cumplimiento.

$P_{i_{cr}} * r$	>	CDP
294.92	>	8.92
CUMPLE		



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



9.5 F4 - COLLAPSE PRESSURE FOR THE GENERAL INSTABILITY UNDER CONSIDERATION OF THE DEEP FRAME

Los cálculos se han realizado de acuerdo al apartado F4 del Anexo A del documento de la Germanischer Lloyd. "Rules for Classification and Construction. I, Ship Technology. Part 5, Underwater Technology. Chapter 2, Manned Submersibles. (Edition 2009)". (Ref. [1]).

En este apartado se trata el cálculo de la inestabilidad general, modo de fallo descrito en el apartado 7.6.4 "Fallo por inestabilidad general" de este documento.

Donde a pesar de estar las cuadernas correctamente distanciadas y proporcionadas en sus elementos constructivos, puede ocurrir que no puedan mantener la circularidad al irse aumentando progresivamente la presión exterior e ir recibiendo estas una carga cada vez mayor procedente del forro.

Este fenómeno comienza por las cuadernas más alejadas de los extremos y se propaga hacia los mamparos que, por su enorme rigidez frente a ovalización, se deforman muy poco y permanecen circulares.

Para una presión exterior constante es muy importante tener una circularidad inicial de construcción lo más perfecta que sea posible, con vistas a evitar o retrasar la inestabilidad general.

Como ya se mencionó en el apartado 8.2.3 "Tolerancias constructivas" de este documento, la falta de circularidad máxima permitida inicial es definida en el Anexo B "Fabrication tolerances for the pressure hull", fijando un valor de $\pm 0,2\%$ del diámetro nominal del casco resistente, ($W_0 = 6\text{mm}$).

La presión de inestabilidad total (P_{ng}) debe de ser evaluada hasta un número de nodos $n=5$, ya que la influencia de cada nodo depende de la eslora del departamento que estemos considerando. Siendo un número de nodos bajo ($n=2$) más influyente con grandes esloras y el número de nodos alto ($n=5$) más influyente con esloras pequeñas de departamentos.

Como condición para materiales con un comportamiento elástico lineal $\sigma_{0,01} \geq 0,8 \cdot \sigma_{0,2}$ (material utilizado para la construcción de la estructura del casco resistente, GL-F 690) se han de cumplir los siguientes límites de tensión (sin considerar la debilidad local):

- La suma de "Basic Stress (σ_{sp})" y "Stress due to out-of-roundness (σ_b)" en el ala de la cuaderna, no excederá de $\sigma_{0,2} = 690 \text{ N/mm}^2$.
- La suma de "Basic Stress (σ_{RSp})" y "Stress due to out-of-roundness (σ_b)" en el ala de la bulárcama, no excederá del 80% de $\sigma_{0,2} = 552 \text{ N/mm}^2$.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



El elemento determinante para el cálculo es la inercia de las cuadernas y la bulárcama:

- Cuadernas:

	Sección de la cuaderna	A_{sp}	3750 mm ²
	Sección cuaderna + plancha asociada	$A_{sp,t}$	11251 mm ²
	Momento de inercia del conjunto cuaderna + plancha asociada	I_{sp}	26802348 mm ⁴

- Bulárcama:

	Sección de la bulárcama	A_{Rsp}	13825 mm ²
	Sección bulárcama + plancha asociada	$A_{Rsp,t}$	28967 mm ²
	Momento de inercia del conjunto bulárcama + plancha asociada	I_R	521142711 mm ⁴

Y las esloras de los compartimentos bajo estudio, (ver figura 19).

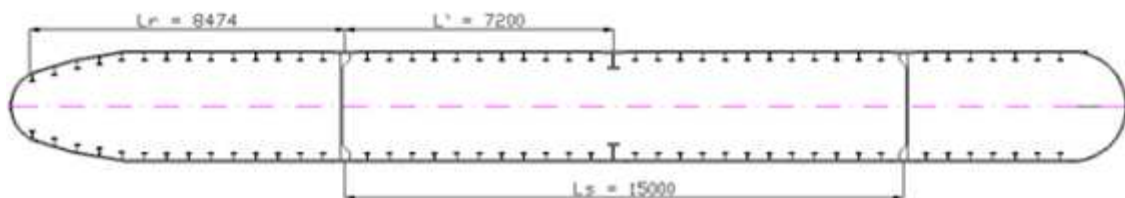


Figura 19: Esloras de compartimentos bajo estudio.

Siendo las tablas resumen de resultados para $n=2,3,4$ y 5 las siguientes:



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



(n = 2)				
Basic stress in the frame flange (A24)	$\sigma_{\varphi}^{m_{Fw}}$	-331.78 N/mm ²	Cuaderna	
Basic stress in the web frame flange (A24)	$\sigma_{\varphi}^{m_{Fw}}$	-188.06 N/mm ²	$\sigma_{\varphi}^{m_{Fw}} + \sigma_{\varphi,D} < \sigma_{0,2}$	
Membrane part (A64)	p_m	25.00 N/mm ²	689.20 < 690	CUMPLE
Deep frame part (A65)	p_D	21.25 N/mm ²		
Frame part (A67)	p_F	8.58 N/mm ²		
Bulkhead part (A68)	p_B	0.64 N/mm ²		
Total instability pressure (A66)	p_g^2	13.58 N/mm ²	Bulárcama	
Bending stress in the frame (A61)	$\sigma_{\varphi,D}$	-357.43 N/mm ²	$\sigma_{\varphi}^{m_{Fw}} + \sigma_{\varphi,D} < 0,8 \cdot \sigma_{0,2}$	
Bending stress in the web frame (A61)	$\sigma_{\varphi,D}$	-166.29 N/mm ²	354.35 < 552	CUMPLE
Elastic bending deflection for frames (A62)	w_{el}	11.48 mm		
Elastic bending deflection for web f. (A63)	w_{el}	2.35 mm		

Tabla F4.1: Resultados "General instability" para n=2.

(n = 3)				
Basic stress in the frame flange (A24)	$\sigma_{\varphi}^{m_{Fw}}$	-331.78 N/mm ²	Cuaderna	
Basic stress in the web frame flange (A24)	$\sigma_{\varphi}^{m_{Fw}}$	-188.06 N/mm ²	$\sigma_{\varphi}^{m_{Fw}} + \sigma_{\varphi,D} < \sigma_{0,2}$	
Membrane part (A64)	p_m	0.45 N/mm ²	-628.99 < 690	CUMPLE
Deep frame part (A65)	p_D	57.25 N/mm ²		
Frame part (A67)	p_F	23.36 N/mm ²		
Bulkhead part (A68)	p_B	0.05 N/mm ²		
Total instability pressure (A66)	p_g^2	23.86 N/mm ²	Bulárcama	
Bending stress in the frame (A61)	$\sigma_{\varphi,D}$	-297.21 N/mm ²	$\sigma_{\varphi}^{m_{Fw}} + \sigma_{\varphi,D} < 0,8 \cdot \sigma_{0,2}$	
Bending stress in the web frame (A61)	$\sigma_{\varphi,D}$	-5.30 N/mm ²	-193.36 < 552	CUMPLE
Elastic bending deflection for frames (A62)	w_{el}	3.58 mm		
Elastic bending deflection for web f. (A63)	w_{el}	0.03 mm		

Tabla F4.2: Resultados "General instability" para n=3.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



(n = 4)		
Basic stress in the frame flange (A24)	$\sigma_{\varphi}^{m_{FW}}$	-331.78 N/mm ²
Basic stress in the web frame flange (A24)	$\sigma_{\varphi}^{m_{FW}}$	-188.06 N/mm ²
Membrane part (A64)	p _m	0.08 N/mm ²
Deep frame part (A65)	p _D	107.64 N/mm ²
Frame part (A67)	p _F	44.18 N/mm ²
Bulkhead part (A68)	p _B	0.01 N/mm ²
Total instability pressure (A66)	p _g ²	44.27 N/mm ²
Bending stress in the frame (A61)	$\sigma_{\varphi,D}$	-235.57 N/mm ²
Bending stress in the web frame (A61)	$\sigma_{\varphi,D}$	-0.39 N/mm ²
Elastic bending deflection for frames (A62)	w _{el}	1.51 mm
Elastic bending deflection for web f. (A63)	w _{el}	0.0011 mm

Cuaderna	
$\sigma_{\varphi}^{m_{FW}} + \sigma_{\varphi,D}$	< σ _{0,2}
-567.35	< 690
CUMPLE	

Bulárcama	
$\sigma_{\varphi}^{m_{FW}} + \sigma_{\varphi,D}$	< 0,8*σ _{0,2}
-188.45	< 552
CUMPLE	

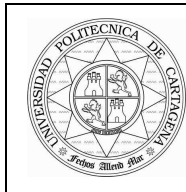
Tabla F4.3: Resultados "General instability" para n=4.

(n = 5)		
Basic stress in the frame flange (A24)	$\sigma_{\varphi}^{m_{FW}}$	-331.78 N/mm ²
Basic stress in the web frame flange (A24)	$\sigma_{\varphi}^{m_{FW}}$	-188.06 N/mm ²
Membrane part (A64)	p_m	0.02 N/mm ²
Deep frame part (A65)	p_D	172.44 N/mm ²
Frame part (A67)	p_F	70.96 N/mm ²
Bulkhead part (A68)	p_B	0.002 N/mm ²
Total instability pressure (A66)	p_g^2	70.98 N/mm ²
Bending stress in the frame (A61)	$\sigma_{\varphi,D}$	-214.70 N/mm ²
Bending stress in the web frame (A61)	$\sigma_{\varphi,D}$	-0.06 N/mm ²
Elastic bending deflection for frames (A62)	w_{el}	0.86 mm
Elastic bending deflection for web f. (A63)	w_{el}	-0.06 mm

Cuaderna	
$\sigma_{\varphi}^{m_{FW}} + \sigma_{\varphi,D}$	< $\sigma_{0,2}$
-546.48	< 690
CUMPLE	

Bulárcama	
$\sigma_{\varphi}^{m_{FW}} + \sigma_{\varphi,D}$	< $0,8 \cdot \sigma_{0,2}$
-188.12	< 552
CUMPLE	

Tabla F4.4: Resultados "General instability" para n=5.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



9.6 F5 - COLLAPSE PRESSURE FOR TRIPPING OF FRAMES

Los cálculos se han realizado de acuerdo al apartado F5 del Anexo A del documento de la Germanischer Lloyd. "Rules for Classification and Construction. I, Ship Technology. Part 5, Underwater Technology. Chapter 2, Manned Submersibles. (Edition 2009)". (Ref. [1]).

En este apartado, se evalúan las tensiones adicionales causadas por las imperfecciones constructivas de las cuadernas, descritas en el apartado 8.2.3 "Tolerancias constructivas" de este documento. Las cuales crean varias formas de inestabilidad o fallo que corresponden al fallo de la cuaderna como conjunto alma-ala.

Estas formas o modos de fallo son:

- Modo 1 – Vuelco lateral de la cuaderna completa formando ondas, alternativamente hacia un costado y hacia otro, de su plano.
- Modo 2 – Desplazamiento uniforme del ala de la cuaderna hacia un costado. El ala de la cuaderna se desplaza hacia proa o popa en toda su longitud.

Para la resolución de los cálculos de este apartado, es necesario el valor de "Basic stress in flange (σ_0)" para las cuadernas y la bulárcama como dato de entrada para inicializar las operaciones. Este valor viene definido en el apartado F5.3 y F5.4 del Anexo A del documento de la Germanischer Lloyd (Ref. [1]). Atendiendo a este criterio se obtiene:

- "Basic stress in flange" para las cuadernas: $\sigma_0 = \sigma_{0,2} = 690 \text{ N/mm}^2$.
- "Basic stress in flange" para la bulárcama: $\sigma_0 = 354.35 \text{ N/mm}^2$.

Como condición de cumplimiento para materiales con un comportamiento elástico lineal $\sigma_{0,01} \geq 0.8 \cdot \sigma_{0,2}$ (material utilizado para la construcción de la estructura del casco resistente, GL-F 690) se han de cumplir los siguientes límites de tensión (sin tener en cuenta la debilidad local del material):

Para las cuadernas:

- El "Equivalent Stress" (σ_v) en las cuadernas no excederá de $\sigma_{0,2}=690 \text{ N/mm}^2$.
- El "Circumferential Stress" (σ_ϕ) en el ala no excederá de $\sigma_{0,2}=690 \text{ N/mm}^2$.

Para la bulárcama:

- El "Equivalent Stress" (σ_v) en la bulárcama no excederá de $\sigma_{0,2}=690 \text{ N/mm}^2$.
- Condición 2 $\sigma_0 + |\sigma_{b,G}| \leq \sigma_{0,2} = 690 \text{ N/mm}^2$.
- Condición 3 $\sqrt{(\sigma_0^2 + 3\tau_G^2)} \leq \sigma_{0,2} = 690 \text{ N/mm}^2$.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



Las tablas resumen (F5.1 y F5.2) de resultados para todas las combinaciones de imperfecciones de las cuadernas son las siguientes:

Cuaderna $\theta = +0,035$ rad, $u_{ex}=3.44$ mm y $d=4$ mm					
Circumferential stress:	$\sigma_{\phi,F}^{m+b} = \sigma_{\phi,Fw}^m + \frac{e_2}{e_1} \cdot \sigma_{O/R} \pm v \cdot \sigma_{r,Fw}^b$ (A105)	σ_{ϕ}	-180.53 N/mm ²		
			-305.86 N/mm ²		
Equivalent stress:	$\sigma_v = \sqrt{\sigma_{\phi}^2 + \sigma_r^2 - \sigma_{\phi} \cdot \sigma_r}$ (A108)	σ_v	262.96 N/mm ²		
			258.87 N/mm ²		
			381.17 N/mm ²		
			301.33 N/mm ²		
$\sigma_{0,2}$	>	σ_{ϕ}	$\sigma_{0,2}$	>	σ_v
690	>	305.86	690	>	381.17
CUMPLE			CUMPLE		

Tabla F5.1: Cuaderna con imperfecciones constructivas: $\theta=+0,035$ rad, $u_{ex}=3.44$ mm y $d=4$ mm.

Cuaderna $\theta = -0,035$ rad, $u_{ex}=3.44$ mm y $d=4$ mm					
Circumferential stress:	$\sigma_{\phi,F}^{m+b} = \sigma_{\phi,Fw}^m + \frac{e_2}{e_1} \cdot \sigma_{O/R} \pm v \cdot \sigma_{r,Fw}^b$ (A105)	σ_{ϕ}	-237.76 N/mm ²		
			-248.63 N/mm ²		
Equivalent stress:	$\sigma_v = \sqrt{\sigma_{\phi}^2 + \sigma_r^2 - \sigma_{\phi} \cdot \sigma_r}$ (A108)	σ_v	211.72 N/mm ²		
			206.32 N/mm ²		
			222.16 N/mm ²		
			216.11 N/mm ²		
$\sigma_{0,2}$	>	σ_{ϕ}	$\sigma_{0,2}$	>	σ_v
690	>	248.63	690	>	222.16
CUMPLE			CUMPLE		

Tabla F5.2: Cuaderna con imperfecciones constructivas: $\theta=-0,035$ rad, $u_{ex}=3.44$ mm y $d=4$ mm.

Siendo las tolerancias constructivas en las cuadernas:

Excentricidad entre alma y ala	u_{ex}	3.44 mm
Inclinación del alma	θ	$\pm 2^\circ$ (0.035 rad)
Posición del pie respecto al plano de referencia	d	+ 4 mm

Las tablas resumen (F5.3, F5.4, F5.5 y F5.6) de resultados para la bulárcama son las siguientes:

Bulárcama $\theta = +0,035$ rad, $u_{ex}=7.2$ mm y $d = +6$ mm								
Condición 1:		$\sigma_0 + |\sigma_{r,Df}^b| \leq \sigma_{0,2}$ (A109)				566.21 N/mm ²		
Condición 2:		$\sqrt{\sigma_0^2 + 3 \cdot \tau_{t,Df}^2} \leq \sigma_{0,2}$ (A110)				355.35 N/mm ²		
Equivalent stress:		$\sigma_v = \sqrt{\sigma_\phi^2 + \sigma_r^2 - \sigma_\phi \cdot \sigma_r} \leq \sigma_{0,2}$ (A111)				σ_v	426.45 N/mm ²	
							509.14 N/mm ²	
							455.68 N/mm ²	
							326.24 N/mm ²	
$\sigma_{0,2}$	>	Cond. 1	σ_{02}	>	Cond. 2	$\sigma_{0,2}$	>	σ_v
690	>	566.21	690	>	355.35	690	>	509.14
CUMPLE		CUMPLE				CUMPLE		

Tabla F5.3: Bulárcama con imperfecciones constructivas: $\theta=+0,035$ rad, $u_{ex}=7.2$ mm y $d=+6$ mm.

Bulárcama $\theta = +0,035$ rad, $u_{ex}=7.2$ mm y $d = -6$ mm								
Condición 1:		$\sigma_0 + |\sigma_{r,Df}^b| \leq \sigma_{0,2}$ (A109)				470.60 N/mm ²		
Condición 2:		$\sqrt{\sigma_0^2 + 3 \cdot \tau_{t,Df}^2} \leq \sigma_{0,2}$ (A110)				355.21 N/mm ²		
Equivalent stress:		$\sigma_v = \sqrt{\sigma_\phi^2 + \sigma_r^2 - \sigma_\phi \cdot \sigma_r} \leq \sigma_{0,2}$ (A111)				σ_v	250.73 N/mm ²	
							271.05 N/mm ²	
							227.85 N/mm ²	
							177.06 N/mm ²	
$\sigma_{0,2}$	>	Cond. 1	σ_{02}	>	Cond. 2	$\sigma_{0,2}$	>	σ_v
690	>	470.60	690	>	355.21	690	>	271.05
CUMPLE		CUMPLE				CUMPLE		

Tabla F5.4: Bulárcama con imperfecciones constructivas: $\theta=+0,035$ rad, $u_{ex}=7.2$ mm y $d=-6$ mm.

Bulárcama $\theta = -0,035$ rad, $u_{ex}=7.2$ mm y $d = +6$ mm								
Condición 1:		$\sigma_0 + |\sigma_{r,Df}^b| \leq \sigma_{0,2}$ (A109)				356.95 N/mm ²		
Condición 2:		$\sqrt{\sigma_0^2 + 3 \cdot \tau_{t,Df}^2} \leq \sigma_{0,2}$ (A110)				354.86 N/mm ²		
Equivalent stress:		$\sigma_v = \sqrt{\sigma_\phi^2 + \sigma_r^2 - \sigma_\phi \cdot \sigma_r} \leq \sigma_{0,2}$ (A111)				σ_v	155.02 N/mm ²	
							176.53 N/mm ²	
							206.64 N/mm ²	
							202.23 N/mm ²	
$\sigma_{0,2}$	>	Cond. 1	σ_{02}	>	Cond. 2	$\sigma_{0,2}$	>	σ_v
690	>	356.95	690	>	354.86	690	>	206.64
CUMPLE		CUMPLE				CUMPLE		

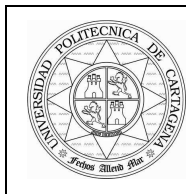
Tabla F5.5: Bulárcama con imperfecciones constructivas: $\theta = -0,035$ rad, $u_{ex}=7.2$ mm y $d = +6$ mm.

Bulárcama $\theta = -0,035$ rad, $u_{ex}=7.2$ mm y $d = -6$ mm								
Condición 1:		$\sigma_0 + |\sigma_{r,Df}^b| \leq \sigma_{0,2}$ (A109)				452.56 N/mm ²		
Condición 2:		$\sqrt{\sigma_0^2 + 3 \cdot \tau_{t,Df}^2} \leq \sigma_{0,2}$ (A110)				354.76 N/mm ²		
Equivalent stress:		$\sigma_v = \sqrt{\sigma_\phi^2 + \sigma_r^2 - \sigma_\phi \cdot \sigma_r} \leq \sigma_{0,2}$ (A111)				σ_v	269.32 N/mm ²	
							374.33 N/mm ²	
							426.25 N/mm ²	
							365.12 N/mm ²	
$\sigma_{0,2}$	>	Cond. 1	σ_{02}	>	Cond. 2	$\sigma_{0,2}$	>	σ_v
690	>	452.56	690	>	354.76	690	>	426.25
CUMPLE		CUMPLE				CUMPLE		

Tabla F5.6: Bulárcama con imperfecciones constructivas: $\theta = -0,035$ rad, $u_{ex}=7.2$ mm y $d = -6$ mm.

Siendo las tolerancias constructivas en la bulárcama:

Excentricidad entre alma y ala	u_{ex}	7.2 mm
Inclinación del alma	θ	$\pm 2^\circ$ (0.035 rad)
Posición del pie respecto al plano de referencia	d	± 6 mm



9.7 F6 – SPHERICAL SHELLS AND DISHED ENDS

Los cálculos se han realizado de acuerdo al apartado F6 del Anexo A del documento de la Germanischer Lloyd. “Rules for Classification and Construction. I, Ship Technology. Part 5, Underwater Technology. Chapter 2, Manned Submersibles. (Edition 2009)”. (Ref. [1]).

El cálculo de los domos de proa y popa se basa en el espesor local del domo y su radio de curvatura. Para el cálculo de los radios medios, el radio nominal de curvatura se ha de multiplicar por una constante igual a 1.4. Siendo estos valores:

		Domo de Popa	Domo de Proa
Radio nominal del domo	R_d	1000 mm	1500 mm
Radio de curvatura al exterior del casco	$R_{a,1}$	1400 mm	2100 mm
Radio de curvatura al espesor medio	$R_{m,1}$	1378.3 mm	2072.7 mm
Espesor de la esfera	h_1	25 mm	30 mm
Ángulo	α	17 °	0 °

Como condición de cumplimiento se tiene que demostrar que la “Theoretical inelastic buckling pressure of the sphere” $P_{i_{cr}}$ es al menos igual a la presión de buceo de colapso, 8,92 N/mm², de cálculo del casco resistente.

Condición de cumplimiento en el domo de Proa.

$P_{i_{cr}}$	>	CDP
13.61	>	8.92
CUMPLE		

Tabla F6.1: Domo de proa.

Condición de cumplimiento en el domo de Popa.

$P_{i_{cr}}$	>	CDP
20.01	>	8.92
CUMPLE		

Tabla F6.2: Domo de popa.

9.8 F7 - PENETRATION OF THE PRESSURE HULL AND DISCONTINUITIES

Los cálculos se han realizado de acuerdo al apartado F7 del Anexo A del documento de la Germanischer Lloyd. "Rules for Classification and Construction. I, Ship Technology. Part 5, Underwater Technology. Chapter 2, Manned Submersibles. (Edition 2009)". (Ref. [1]).

Este apartado basa sus cálculos en el principio de áreas de sustitución, considerando que la resistencia del material es la misma para el casco resistente que la usada en las planchas de refuerzo en el límite de las penetraciones.

Para las penetraciones de los mástiles y otros servicios, por ejemplo, el de inducción y el de exhaustación de los grupos electrógenos, se aplica el apartado F7.3 "Penetrations in the cylindrical or conical part of the pressure hull – cross sectional área substitution principle", apartado 7.3.1 "Small penetrations which do not interrupt frames", sub-apartado 7.3.1.1 "Circular penetrations in radial direction", situación que se caracteriza por la siguiente figura:

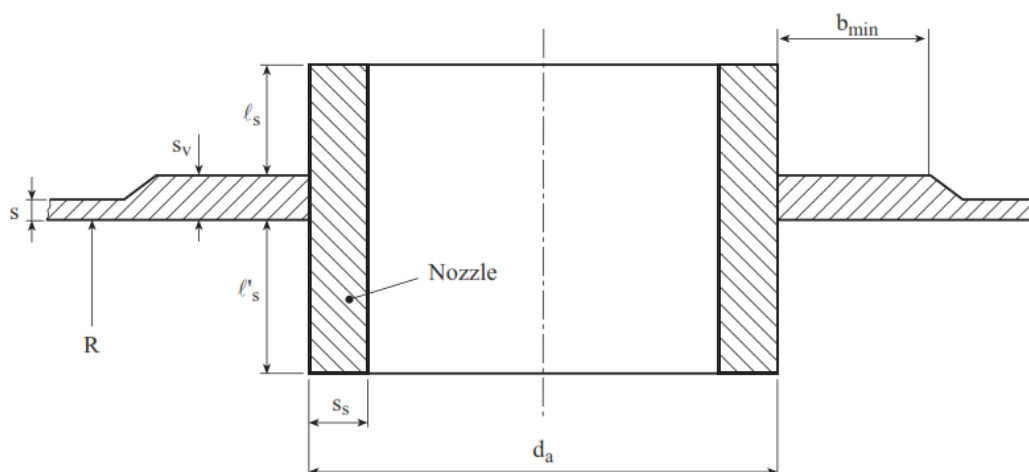


Figura 20: Diseño de refuerzo de una pequeña penetración circular que no interrumpe cuadernas.

Se va a realizar el estudio genérico para la mayor penetración que no interrumpe cuadernas, siendo su diámetro exterior máximo de $d = 500$ mm y sus datos de partida:

Espesor del casco resistente	s	25 mm
Espesor de la plancha de conexión	s_v	40 mm
Longitud de la boquilla por el exterior del casco	l_s	75 mm
Longitud de la boquilla por el interior del casco	l'_s	100 mm
Espesor de la boquilla de conexión	s_s	40 mm
Radio interno del casco resistente	R	1484 mm



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



Condición de cumplimiento:

Área de la sección transversal a sustituir	A	6250 mm ²
Área efectiva que sustituye	A _{eff}	7973 mm ²

$A_{eff} \geq A$
CUMPLE

Siendo para los anteriores datos de entrada, la longitud efectiva de la plancha de conexión dependiente de la situación en la que nos encontremos:

Case 1:

$$\ell_{eff} = 2 \cdot \ell^* + s_v \quad \text{for} \quad (A134)$$

$$\ell_s \geq \ell^*; \quad \ell'_s \geq \ell^* \quad (A135)$$

Case 2:

$$\ell_{eff} = 2 \cdot \ell_{min} + s_v \quad (A136)$$

$$\frac{\ell^*}{2} \leq \ell_{min} \leq \ell^* \quad (A137)$$

Case 3:

$$\ell_{eff} = \ell_{min} + \min\left(a, \frac{\ell^*}{2}\right) + s_v \quad (A138)$$

$$\ell_{min} < \frac{\ell^*}{2}; \quad \ell_{max} > \frac{\ell^*}{2} \quad (A139)$$

$$a = \ell_{max} \left(0,4 + 0,6 \frac{\ell_{min}^2}{\ell_{max}^2}\right) \quad (A140)$$

Longitud de la plancha de conexión	ℓ_{eff}	170 mm
------------------------------------	--------------	--------

Las grandes penetraciones que interrumpen cuadernas (escotillas, esclusa y brecha), se pueden pre-diseñar de manera análoga a las pequeñas penetraciones. De igual modo, hay que sustituir el área de corte por un área efectiva considerando también el área adicional de las estructuras interrumpidas.

Además, es requisito de la norma GL que sean probadas por programas numéricos de computación estructural.

9.9 ACRYLIC WINDOWS

Los cálculos se han realizado de acuerdo al Anexo C “Acrylic Windows” del documento de la Germanischer Lloyd. “Rules for Classification and Construction. I, Ship Technology. Part 5, Underwater Technology. Chapter 2, Manned Submersibles. (Edition 2009)”. (Ref. [1]).

Sus límites de aplicación son:

- Vida útil: 10 años para ventanas planas y 20 años para ventanas esféricas.
- Rango de temperaturas: de -18°C a +66°C.
- Tasa de presurización máxima: 10 bar/s.
- Ciclos de presión a presión de diseño: máximo 10.000 ciclos.
- Periodo de presión a presión de diseño: máximo 40.000 h.
- Máxima presión permitida: 1380 bar.

Con aplicación a ventanas acrílicas planas o curvas, usadas como puntos de visión a través del casco resistente, hechas de metacrilato de metilo sin laminar, cuyas propiedades mecánicas mínimas son:

Resistencia de rotura a tracción	≥ 62	N/mm ²
Resistencia rotura a compresión	≥ 103	N/mm ²
Alargamiento a tracción	≥ 2	%
Deformación a compresión	≤ 1	%
Módulo de elasticidad	≥ 2760	N/mm ²
Transmitancia ultravioleta	≤ 5	%
Peso específico	1.18	g/cm ³

El puerto panorámico de observación es esférico con un ángulo de visión de $\alpha = 180^\circ$, un diámetro interior de $D_i = 1000$ mm y una profundidad de diseño de colapso de CDD = 880 m.

Entrando en la siguiente figura obtenemos para 24°C una relación entre espesor ventana y diámetro interior (s/D_i) = 0.112.

Lo que hace que el espesor del puerto de observación sea de 112 mm.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



Range of application:

Opening angle : $180^\circ \geq \alpha \geq 120^\circ$

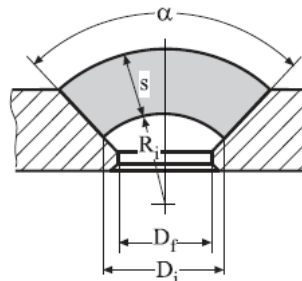
Minimum wall thickness : $s \geq 12,5 \text{ mm}$

Minimum values for s/R_i :

α	$120^\circ \leq \alpha < 180^\circ$	$\alpha = 180^\circ$
s/R_i	0,06	0,03

Window seating : $D_i/D_f \geq 1,02$

Max. allowable working pressure : $p \leq 170 \text{ bar}$



Design pressure PR [bar]	Minimum wall thickness / Inside diameter of seat s/D_i for $120^\circ \leq \alpha < 180^\circ$ at					Design pressure PR [bar]	Minimum wall thickness / Inside diameter of seat s/D_i for $\alpha = 180^\circ$ at				
	10 °C	24 °C	38 °C	52 °C	66 °C		10 °C	24 °C	38 °C	52 °C	66 °C
5	0,021	0,023	0,025	0,028	0,034	5	0,018	0,018	0,019	0,021	0,026
10	0,025	0,030	0,034	0,038	0,050	10	0,019	0,023	0,026	0,030	0,041
15	0,030	0,036	0,042	0,048	0,067	15	0,023	0,028	0,034	0,039	0,056
20	0,034	0,042	0,050	0,059	0,083	20	0,026	0,034	0,041	0,049	0,071
25	0,038	0,048	0,059	0,069	0,100	25	0,030	0,039	0,049	0,058	0,086
30	0,042	0,054	0,067	0,079	0,117	30	0,034	0,045	0,056	0,068	0,101
35	0,046	0,061	0,075	0,090	0,131	35	0,038	0,051	0,064	0,077	0,115
40	0,050	0,067	0,083	0,100	0,146	40	0,041	0,056	0,071	0,086	0,129
45	0,054	0,073	0,092	0,110	0,161	45	0,045	0,062	0,079	0,096	0,142
50	0,059	0,079	0,100	0,119	0,175	50	0,049	0,068	0,086	0,105	0,155
60	0,067	0,092	0,117	0,138	0,204	60	0,056	0,079	0,101	0,122	0,182
70	0,075	0,104	0,131	0,157	0,232	70	0,064	0,090	0,115	0,139	0,207
80	0,083	0,117	0,146	0,175	0,259	80	0,071	0,101	0,129	0,155	0,232
90	0,092	0,127	0,161	0,193	0,285	90	0,079	0,112	0,142	0,172	0,256
100	0,100	0,138	0,175	0,211	0,310	100	0,086	0,122	0,155	0,188	0,278
110	0,108	0,149	0,190	0,228	0,334	110	0,094	0,132	0,168	0,204	0,299
120	0,117	0,161	0,204	0,245	0,357	120	0,101	0,142	0,182	0,220	0,319
130	0,123	0,171	0,218	0,262	0,379	130	0,108	0,152	0,194	0,235	0,337
140	0,131	0,182	0,232	0,278	0,400	140	0,115	0,162	0,207	0,250	0,352
150	0,138	0,193	0,245	0,294		150	0,122	0,172	0,220	0,264	0,366
160	0,146	0,204	0,259	0,310		160	0,129	0,182	0,232	0,278	
170	0,153	0,214	0,272	0,325		170	0,135	0,191	0,244	0,292	

Figura 21: Dimensiones estándar para ventanas con asiento cónico ($\alpha = 120^\circ/180^\circ$)

9.10 RESUMEN DE RESULTADOS

El resumen de condiciones de cumplimiento se detalla en la siguiente tabla:

F2 ASYMMETRIC INTERSTIFFENER BUCKLING				
Theoretical inelastic buckling pressure (casco plano)	16.94	>	8.92	CUMPLE
Theoretical inelastic buckling pressure (casco cónico 10°)	18.11	>	8.92	CUMPLE
Theoretical inelastic buckling pressure (casco cónico 17°)	24.78	>	8.92	CUMPLE
F3 SYMMETRIC INTERSTIFFENER				
Theoretical inelastic buckling pressure (casco plano)	88.72	>	8.92	CUMPLE
Theoretical inelastic buckling pressure (casco cónico 10°)	114.96	>	8.92	CUMPLE
Theoretical inelastic buckling pressure (casco cónico 17°)	294.92	>	8.92	CUMPLE
F4 GENERAL INSTABILITY				
Basic stress + stress due to out-of-roundness in frame (n=2)	689.20	<	690	CUMPLE
Basic stress + stress due to out-of-roundness in deep frame (n=2)	354.35	<	552	CUMPLE
Basic stress + stress due to out-of-roundness in frame (n=3)	628.99	<	690	CUMPLE
Basic stress + stress due to out-of-roundness in deep frame (n=3)	193.36	<	552	CUMPLE
Basic stress + stress due to out-of-roundness in frame (n=4)	567.35	<	690	CUMPLE
Basic stress + stress due to out-of-roundness in deep frame (n=4)	188.45	<	552	CUMPLE
Basic stress + stress due to out-of-roundness in frame (n=5)	546.48	<	690	CUMPLE
Basic stress + stress due to out-of-roundness in deep frame (n=5)	188.12	<	552	CUMPLE
F5 TRIPPING OF FRAMES				
Equivalent stress ($\theta=+0,035$ rad, $u_{ex}=3.44$ mm y $d=4$ mm)	305.86	<	690	CUMPLE
Circumferential stress ($\theta=+0,035$ rad, $u_{ex}=3.44$ mm y $d=4$ mm)	381.17	<	690	CUMPLE
F5 TRIPPING OF DEEP FRAME				
Condición 1 ($\theta=+0,035$ rad, $u_{ex}=7.2$ mm y $d=+6$ mm)	566.21	<	690	CUMPLE
Condición 2 ($\theta=+0,035$ rad, $u_{ex}=7.2$ mm y $d=+6$ mm)	355.35	<	690	CUMPLE
Equivalent stress ($\theta=+0,035$ rad, $u_{ex}=7.2$ mm y $d=+6$ mm)	509.14	<	690	CUMPLE
F6 SPHERICAL ENDS				
Collapse pressure (Domo de proa)	13.61	>	8.92	CUMPLE
Collapse pressure (Domo de popa)	20.01	>	8.92	CUMPLE

10. ESTRATEGIA CONSTRUCTIVA



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



10.1 INTRODUCCIÓN

La construcción de un sumergible es un proceso complicado y sumamente técnico, que exige la coordinación de numerosos trabajadores muy cualificados que a menudo, se ven obligados a trabajar en circunstancias muy alejadas de las ideales y en condiciones físicas muy difíciles, así como en condiciones naturales adversas. Por ello, la construcción y reparación de buques y sumergibles se considera uno de los trabajos más peligrosos en el mundo.

Desde la década de los 80, la construcción naval ha cambiado radicalmente. Antes, la mayor parte de los trabajos de construcción naval tenían lugar en los edificios o las gradas de un astillero, donde se iba levantando el sumergible construyéndolo casi pieza a pieza.

El avance tecnológico y la planificación más detallada permiten ahora construir sumergibles a partir de subunidades o módulos que incorporan instalaciones y sistemas integrados. De esta manera, la conexión de los módulos es relativamente fácil. Se trata de un proceso más rápido, menos costoso y que asegura un control de calidad más estricto. Además, este tipo de construcción se presta a la automatización y la robotización, lo cual ahorra dinero y reduce la exposición a riesgos de naturaleza química y física. Este sistema de construcción se denomina Construcción Integrada o Prefabricación.

La tecnología de grupos permite controlar los costes y aumentar la productividad en la construcción naval. El sistema de construcción integrada permite solapar y trabajar en paralelo en la planificación, diseño y acopio de materiales. Estas características constituyen la clave de una alta productividad, que junto a una planificación y control organizado contribuyen a mantener unas cargas de trabajo repartidas y una disminución de tiempos muertos y cuellos de botella.

Entendiendo como Construcción Integrada, el proceso tecnológico por el que se construye un buque o artefacto flotante, no como un todo desde el principio, sino dividiendo su estructura previamente en varios bloques estructurales (subconjuntos) terminados, que se fabrican, en cierta forma, de manera independiente, y que, una vez terminados, se van montando y uniendo con los bloques adyacentes ya montados, siguiendo paulatinamente la construcción con los trabajos necesarios de enlace entre dichos bloques hasta completar el artefacto.

Puesto que la construcción integrada no es una moda más, fruto de los tiempos que corren, sino la lógica evolución tecnológica de la construcción naval, en este apartado se detalla la estrategia constructiva del sumergible a partir del plano de formas del casco resistente (Anexo V), dónde cuanto menor sea el número de conjuntos y más completa sea su terminación, mayor y mejor será el grado de aplicación de esta técnica.

Los sumergibles y submarinos son buques de características muy especiales, las cuales les condicionan en gran medida su proceso constructivo. Las solicitudes a las que va a estar sometido, los requerimientos de prestaciones, seguridad y aquilatación del espacio disponible, obligan a que los trabajos de estructuras y los trabajos de armamento deban de estar perfectamente engrasados y secuencialmente definidos.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



10.2 CONCEPTOS BÁSICOS DE LA CONSTRUCCIÓN INTEGRADA

La optimización de los bloques es un objetivo clave para un buen sistema de fabricación y montaje del casco, siendo el despiece en bloques la decisión que mayor influencia tiene en la obtención de una alta productividad. Los bloques deben definirse de forma que:

- Se facilite y simplifique su propia fabricación y ensamblaje.
- Permitan un montaje en grada o dique lo más rápido y cómodo posible.
- Tengan el tamaño y disposición adecuados para realizar su armamento y pintado en condiciones rentables y seguras.

Como criterios técnicos recomendables para conseguir un buen despiece en bloques, pueden citarse:

- Adoptar los mayores tamaños y pesos que las instalaciones y procesos de ensamblaje/armado y montaje del astillero permitan.
- Minimizar el número de bloques a montar en grada o dique.
- Seleccionar procesos de ensamblaje que proporcionen la mayor seguridad para los trabajadores.
- Minimizar los reforzados o arriostramientos provisionales.
- Minimizar las necesidades de andamios, número de izadas y de volteos, tanto en su montaje como en su ensamblaje/armado.
- Contemplar los procesos de soldadura asociados para disminuir/eliminar las soldaduras en posiciones difíciles y sustituirlas por soldaduras bajo mano (PA).
- Contemplar los procesos de soldadura asociados para incrementar las uniones soldadas con medios automáticos frente a las soldaduras semiautomáticas o manuales.
- Buscar la mayor repetitividad entre bloques, especialmente en el cuerpo cilíndrico.

Los conceptos que se deben tener como objetivo son fundamentalmente tres:

- Todo lo que pueda terminarse, se debe terminar lo más anticipadamente posible.
- Se debe aprovechar el momento más oportuno para realizar las obras, evitando esfuerzos y posiciones incómodas.
- Se debe inducir un efecto serie, para lo que hay que buscar afinidades en las obras a realizar.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



Los pasos necesarios que se dan para acometer de forma integrada la construcción de un sumergible, teniendo en cuenta los conceptos anteriores son:

- Primer paso: dividir el buque en zonas (definición de los bloques) y considerar que deben ser concebidas como un conjunto de productos intermedios, ésto es básicamente el motor de la construcción integrada.
- Segundo paso: definir las etapas en las que se debe construir cada uno de los productos intermedios (secuencia de fabricación).
- Tercer paso: identificación de módulos estructurales, de equipos, etc., pues con ello anticipamos el trabajo a una fase más temprana realizando la mayor parte de los trabajos en los talleres.

De todo ello se deriva que la estrategia constructiva debe ser realizada con el suficiente tiempo para que no existan retrocesos en el desarrollo del proceso.

10.3 DEFINICIÓN DE LOS BLOQUES

El casco del sumergible se ha dividido en dos secciones, una de popa (S1) con una eslora de 16389 mm y otra de proa (S2) de 13611 mm tal y como se puede apreciar en la siguiente figura:

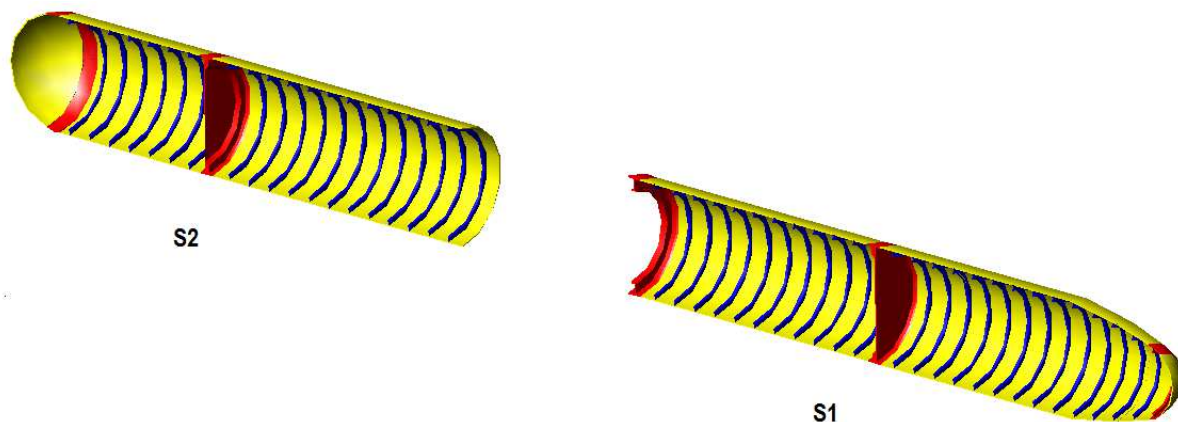


Figura 22: División en secciones del submarino.

Y cada una de estas secciones se ha dividido en dos bloques, (B1 B2) en la sección de popa y (B3 B4) en la sección de proa, Ver figura 23.

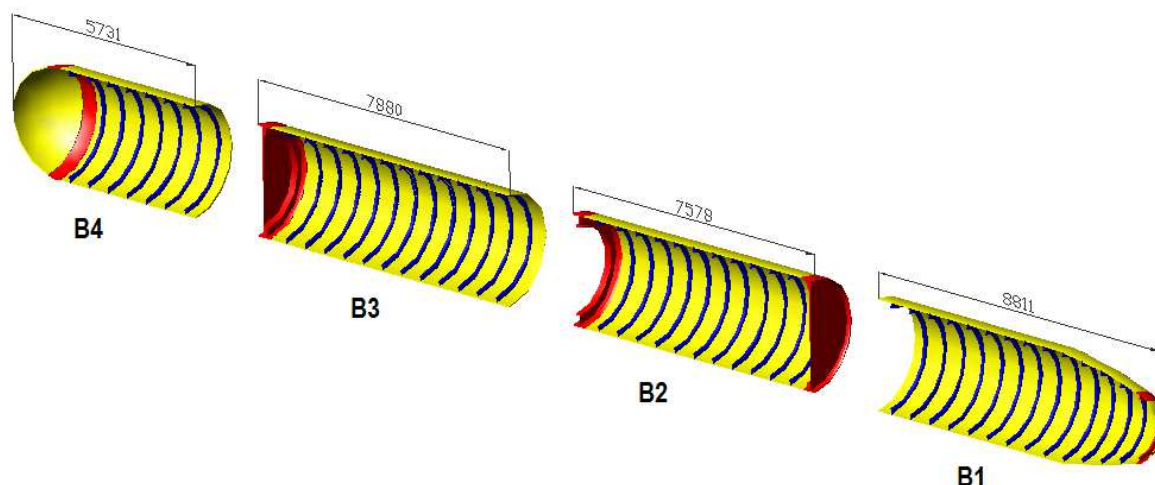


Figura 23: División en bloques constructivos del submarino.

El bloque **B1** abarca desde la cuaderna 0 hasta la cuaderna 14. Tiene una eslora total de 8811 mm y está constituido por 13 cuadernas y los anillos A1, A2, A3 y el anillo resistente del domo de popa AR1. En este bloque se localiza la brecha de acceso de la cámara de máquinas.

El bloque **B2** abarca desde la cuaderna 15 hasta la cuaderna 27. Tiene una eslora total de 7578 mm y está constituido por 11 cuadernas y los anillos A4, A5, el anillo resistente del mamparo de popa AR2 y el anillo resistente de la bulárcama AR3. En este bloque se localiza la esclusa de salvamento.

El bloque **B3** abarca desde la cuaderna 28 hasta la cuaderna 40. Tiene una eslora total de 7880 mm y está constituido por 12 cuadernas y los anillos A6, A7 y el anillo resistente del mamparo de proa AR4. En este bloque se localiza la escotilla de acceso principal que da al interior de la vela.

El bloque **B4** abarca desde la cuaderna 41 hasta la cuaderna 47. Tiene una eslora total de 5731 mm y está constituido por 7 cuadernas y los anillos A8, A9 y el anillo resistente del domo de proa AR5. En este bloque se localiza la escotilla de acceso secundaria.

Con esta división se da acceso a todos los bloques ya que sólo tienen un extremo bloqueado, permitiendo trabajar y embarcar módulos completos de equipos y plataformas por el otro. De este modo, se favorece la construcción integrada al no bloquear el acceso a los puntos de trabajo y tener abiertos el mayor número de frentes de trabajo simultáneamente.

Los módulos de equipos y de habilitación se montarán sobre una bancada común, y se introducirán en el proceso constructivo como un bloque. Con ello, se consigue ampliar el número de puntos y focos de trabajos simultáneos mientras se crea la estructura del casco resistente.

Por último cada bloque se desglosa en anillos de construcción, pudiendo ver en la siguiente figura la definición de todos ellos.

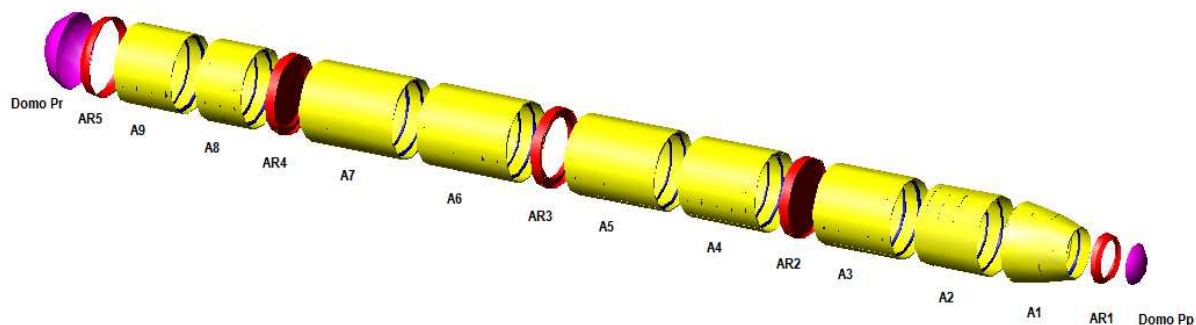


Figura 24: División en anillos constructivos del submarino.

En la siguiente tabla se presenta un resumen de las características principales (eslora en mm y peso en toneladas) de cada anillo, bloque y sección.

Sección	Bloque	Anillo	Eslora	Peso	Eslora	Peso	Eslora	Peso
S1	B1	Domo Pp	376	0.245	8811	18.106	16389	39.237
		AR1	345	0.272				
		A1	2365	4.663				
		A2	2560	5.773				
		A3	3165	7.153				
	B2	AR2	378	3.744	7578	21.131		
		A4	3690	7.085				
		A5	3132	8.375				
AR3		378	1.927					
S2	B3	A6	3688	8.370	7880	20.823	13611	33.752
		A7	3814	8.709				
		AR4	378	3.744				
	B4	A8	1895	4.286	5731	12.929		
		A9	2330	5.342				
		AR5	391	0.893				
		Domo Pr	1115	2.408				

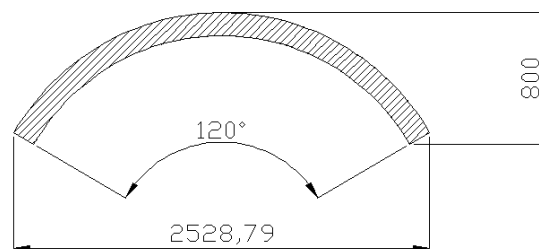


10.4 NIVEL 1. FABRICACIÓN DE PREVIAS SIMPLES.

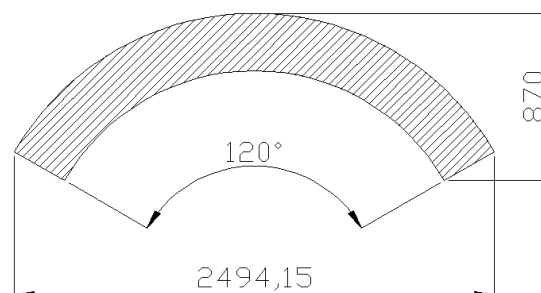
En este nivel se incluyen aquellos componentes para la construcción del bloque que no pueden subdividirse más (previas simples), agrupando los paquetes de trabajo por zona, problema constructivo y etapa.

Las previas son elementos estructurales relativamente sencillos, con características constructivas similares, que se emplean en gran cantidad en el sumergible. Los paquetes de trabajo típicos para un sumergible agrupados por problemas constructivos son:

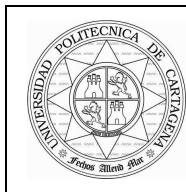
- Perfiles compuestos: elementos que configuran las cuadernas y bulárcama de tipo T y no se fabrican laminados, ver figura 25. Están compuestos por:
 - Previas que conforman el alma de la cuaderna. Las almas de las cuadernas están divididas en tres piezas que abarca 120° cada una. Con un área de 407569 mm^2 , un espesor de 15 mm y un ancho de 100 mm, cuyas medidas son las siguientes:



La bulárcama también está dividida en tres piezas que abarca 120° cada una, con un área de 810530 mm^2 , un espesor de 25 mm y un ancho de 265 mm, cuyas medidas son las siguientes:



- Previas que conforman el ala de la cuaderna. El ala o platabanda de las cuadernas está dividida en dos piezas que abarcan 180° cada una. Tienen una longitud desarrollada de 4586.72 mm, un espesor de 25 mm y una anchura de 70 mm.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



NIVEL 1: FABRICACIÓN DE PREVIAS SIMPLES	
PREVIAS QUE CONFORMAN EL ALMA DE LA CUADERNA	PREVIAS QUE CONFORMAN EL ALA DE LA CUADERNA

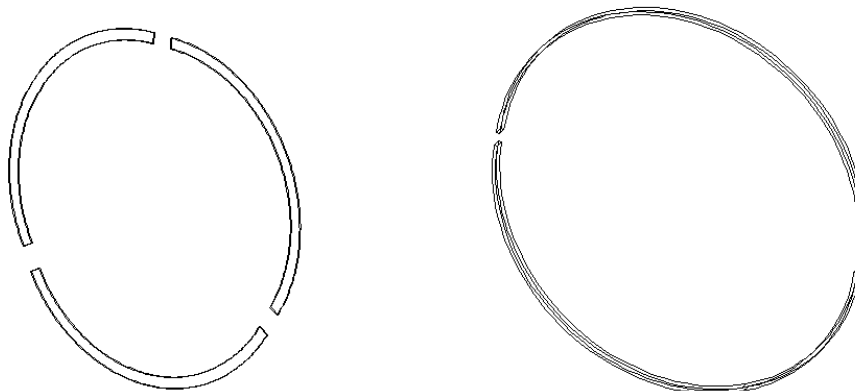


Figura 25: Problema constructivo. Fabricación de previas simples. Ala y alma de cuaderna.

- Piezas prefabricadas: Planchas laminadas que conforman el forro exterior, serán de una única pieza curvada 360°. Con una longitud desarrollada de 9424.77 mm, un espesor de 26 mm y una eslora que depende del anillo que se esté elaborando, siendo la menor 1895 mm y la mayor 3814 mm.

NIVEL 1: FABRICACIÓN DE PREVIAS SIMPLES
PREVIAS QUE CONFORMAN EL FORRO EXTERIOR

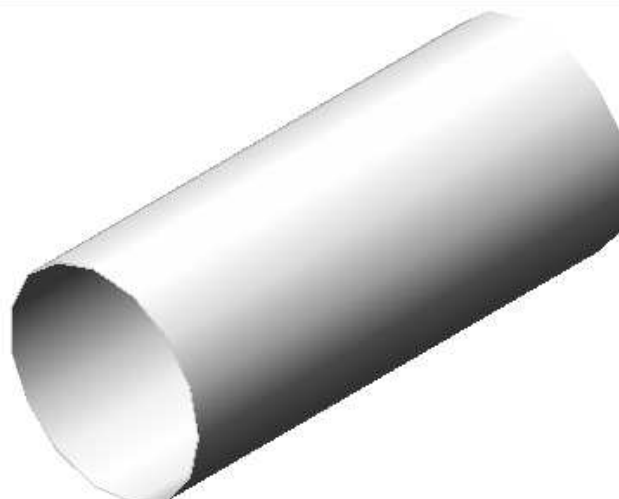


Figura 26: Problema constructivo. Fabricación de previas simples. Forro exterior.

- Previas de refuerzos. Son las previas en forma de cartabones y consolas utilizadas para refuerzo de las zonas donde se ha realizado una brecha o escotilla de acceso. También se usan como refuerzo de polines y bancadas de los bloques de habilitación y equipos. Sus espesores son de 15 mm.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



Las etapas seguidas para la creación de estas previas simples se realizan en los diferentes talleres o zonas de trabajo dentro del astillero, dónde el procedimiento está compuesto por las siguientes etapas y tareas constructivas:

Etapas 1: Recepción de las planchas en el parque de materiales provenientes del suministrador. En esta etapa se ha de verificar el estado superficial de la capa de imprimación de las planchas así como asegurarse del adecuado estado del material comprobando la ausencia de óxido, picaduras, etc., ya que las planchas que vienen hoy en día desde fábrica con tratamiento de imprimación para resistir varios meses a la intemperie, pueden recibirse con cascarilla de laminación, grasa, suciedad, o incluso puntos de oxidación.

También se ha de comprobar que los espesores proporcionados sean los correctos permaneciendo dentro de las tolerancias admisibles y se comprobará que la especificación técnica del material sea la solicitada.

La empresa que suministra el acero lo hace en espesores que abarcan desde 8 hasta 180 mm, anchos de 1500 hasta 4200 mm y longitudes 4000 hasta 18000 mm, lo cual nos permite una amplia gama de posibilidades para realizar un pedido con el menor porcentaje de material sobrante.

Etapas 2: Limpieza del material. En ocasiones el óxido está fuertemente adherido a la superficie, y por tanto, para ser eliminado, no basta con recibir un fuerte cepillado, sino que además requiere que dicha superficie sufra un fuerte tratamiento de limpieza y preparación por medios mecánicos, y en ciertos casos químicos.

Los procedimientos de limpieza y preparación del acero más utilizado son:

- Llameado.
- Desengrasado.
- Mecánicos por raspado y cepillado.
- Limpieza por abrasivos.
- Desoxidación por proceso químico.

Etapas 3: Aplanado de las planchas. Debido al desigual enfriamiento del metal en el proceso de fabricación, así como a las tensiones que sufre durante su laminación, manejo y transporte, las planchas y perfiles llegan al astillero deformados. Esta situación hace el marcado y corte difícil por la precisión que se requiere, y causaría tensiones adicionales en la fabricación y montaje. Las planchas que entran en el taller han de ser rigurosamente planas.

Por tanto, cuando el acero sale del parque de materiales del astillero, hay que someterlo a una serie de operaciones para eliminar las deformaciones, y se pueden llevar a cabo en frío o en caliente. En este caso se trabaja el material en frío, hacemos pasar las planchas entre dos filas de rodillos giratorios de máquinas aplanadoras que las comprimen fuertemente, ver Figura 27.

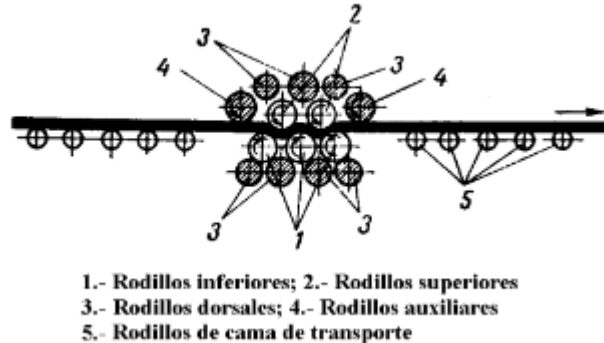


Figura 27: Sección de una aplanadora.

Estas planchas se manipulan mediante electroimanes o mesas de rodillos que las transportan a lo largo de la superficie del taller impidiendo su deformación.

Etapas 4: Marcado de las planchas. Esta etapa se realiza en el taller de elaborado y labrado del acero. Tradicionalmente se dibujaban las piezas dentro de cada plancha, pero en la actualidad no es estrictamente un marcado, sino un anidamiento mediante programas informáticos que ubican las piezas en las planchas y mandan la orden de corte a las máquinas de control numérico.

Un ejemplo del anidamiento de las planchas que conforman el alma de la cuaderna es:

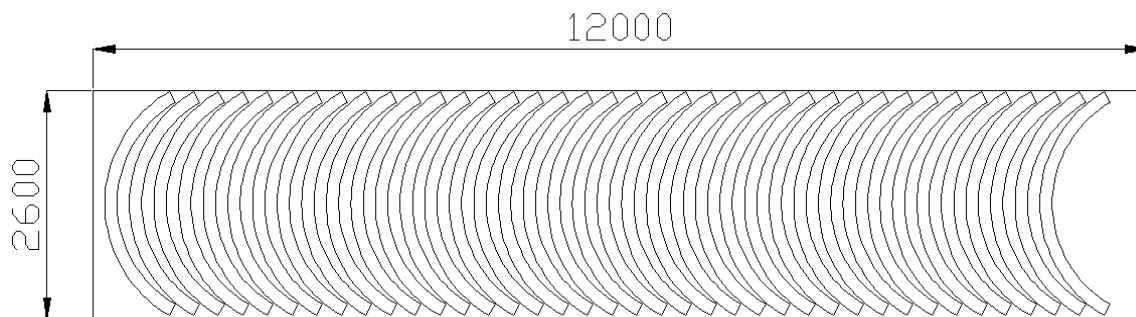


Figura 28: Ejemplo de anidamiento de previas simples.

Con una plancha de 12000x2600 mm creamos previas simples para la elaboración del alma de 13 cuadernas, siendo el material sobrante el menor posible.

De igual modo al mostrado para las almas de las cuadernas, se hace para las diferentes piezas que forman la totalidad de las previas, separándolas por espesores y anidándolas en las diferentes planchas para que el material sobrante sea el menor.

Etapas 5: Corte del metal. El acero que llega a un astillero, lo hace en planchas de tamaño estándar. Antes de su uso, debe cortarse en los tamaños y formas que se necesitan. El corte del metal se puede realizar por medios mecánicos o por procedimientos térmicos entre otros.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



Debido al espesor de las planchas ($t > 15 \text{ mm}$) de este proyecto, se ha elegido el corte por chorro de agua ya que no crea distorsión en el material al no aplicar calor durante el corte. Además tiene una alta precisión y gran calidad para una gran variedad de espesores.



Figura 29: Máquina de corte por chorro de agua.

En este proyecto, como nuestro material es el acero, se agregan partículas abrasivas a la corriente del chorro para facilitar el corte, denominándose este proceso: corte por chorro de agua abrasiva (AWJC). Entre los parámetros que deben de controlarse está el diámetro y tipo de abrasivo, es decir, el tamaño del esmeril que se adiciona para el corte.

Los materiales abrasivos más comunes son: el óxido de aluminio, el dióxido de silicio y el granate (un mineral de silicato, Mesh); los tamaños del esmeril varían entre 60 y 120 micras. Las partículas abrasivas se agregan a la corriente de agua a aproximadamente a 250 – 500 g/min.

La velocidad de avance típica varía desde 5 mm/seg hasta 500 mm/seg, dependiendo del material de trabajo y su espesor. Se hace de forma automática usando un control numérico computarizado o robots industriales para manipular la unidad de la boquilla a lo largo de la trayectoria deseada.

Los parámetros restantes del proceso son: el diámetro de abertura de la boquilla, la presión del agua y la distancia de separación. Los diámetros del orificio de la boquilla varían de 0,25 mm a 0,63 mm y permiten que la corriente contenga velocidades de flujo altas. Las presiones de agua alcanzan valores de 4000 bares y velocidades de 900m/seg.

Las distancias de separación entre la boquilla y la chapa comprendidas entre 0,8 y 1,6 mm.

Siendo la tabla resumen de las especificaciones de corte para los espesores más representativos del proyecto la expuesta a continuación:

Espesor (mm)	Caudal abrasivo (g/min)	Ø orificio (mm)	Velocidad de corte (mm/min)	Abrasivo	Presión bomba (bar)
25 - 26	400	0.25	35	Mesh 80	4200
15	350	0.25	50	Mesh 80	4000

Etapla 6: Preparado de bordes. Como todos los espesores a soldar son superiores a 15 mm, la preparación de bordes seleccionada para el tipo V es con talón de 4 mm y un ángulo entre 50° y 70°. Las uniones en T precisan de preparación de bordes como se detallan en el apartado 11.7 “Variables de soldadura y procedimientos de soldeo” de este documento.

Los bordes se realizan al mismo tiempo que se hace el corte de las planchas.

Etapla 7: Conformado del material. El tipo de previas a fabricar requiere provocar curvaturas en las planchas que conforman el forro y el ala de las cuadernas de la estructura del casco. Existen procedimientos mecánicos en frío o en caliente. Las configuraciones sencillas se realizan en frío mediante cilindros o prensas, y las más complejas se realizan mediante sistemas de conformado por especiales (domos).

En nuestro caso, se opta por curvar nosotros la parte cilíndrica mediante rodillos, y no hacerlo con los domos (son suministrados por una subcontrata), ya que estos requieren prensas y moldes específicamente contruidos para ellos. En ambos casos, el conformado se realiza en frío, para no destruir el tratamiento térmico con el que es suministrado el acero. Una temperatura superior destruye las propiedades mecánicas, lo que obligaría a un nuevo bonificado para restituir las características que se han utilizado para el cálculo del espesor necesario

Las máquinas utilizadas son las curvadoras de rodillos. Estas máquinas hidráulicas trabajan con el acero en frío. Las curvadoras de rodillos son usadas para obtener curvas cilíndricas o cónicas en planchas metálicas (Figura 30). El espesor máximo depende de la potencia que desarrolle llegando hasta los 50 mm.

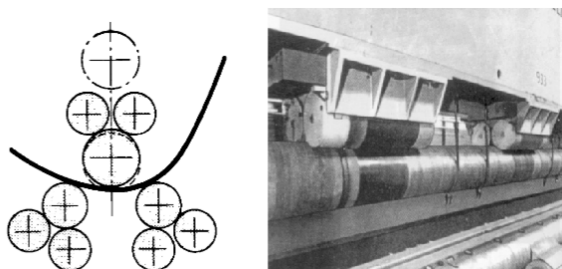


Figura 30: Curvadora de rodillos.

10.5 NIVEL 2. FABRICACIÓN DE PREVIAS COMPLEJAS.

En este nivel se incluyen aquellos conjuntos soldados constituidos por previas simples que irán montados sobre un panel curvo del casco. Sus paquetes de trabajo típicos por problema constructivo son:

- Contenido de trabajo a realizar en gran cantidad. En la construcción de un sumergible estos elementos son las cuadernas, las cuales son idénticas y se repiten a lo largo de la eslora en un número de 39 veces. En general son previas que aprovechan la repetitividad que proporciona al cuerpo cilíndrico. Ver figura 31.
- Contenido de trabajo parecido en pequeña cantidad. Son elementos iguales a los citados anteriormente pero ubicados en el extremo de popa, donde el sumergible adquiere disposición cónica. La única diferencia es que estas cuadernas son más pequeñas y su tamaño no se repite. Hay 4 previas de este tipo en la parte cónica de popa del submarino. Ver figura 31.

También la bulárcama entra en este grupo ya que es de igual forma que las cuadernas, cambiando únicamente su tamaño.

- Contenido de trabajo de elementos especiales. Los elementos estructurales especiales que presenta un sumergible son los mamparos internos de división de espacios estancos.



Figura 31: Problema constructivo. Fabricación de previas complejas. Cuadernas.

Las etapas de fabricación para este nivel constructivo son:

Etapas 8: Posicionamiento de las previas simples y disposición de los útiles de sujeción. Las previas simples provenientes del taller de corte de material mediante mesas transportadoras o rodillos y tras comprobar que las dimensiones son las correctas y que no se han alabeado durante el traslado, se reciben en el taller de montaje.

Montaje del alma: Sobre una mesa de soldadura perfectamente plana, se posicionan las tres piezas que conforman el alma de la cuaderna. Tras comprobar que la circularidad alcanzada permanece dentro de las tolerancias admisibles, se fijan a la mesa mediante útiles de sujeción. Se colocan 6 útiles por cada pieza, cada 20° de circunferencia y se alternan entre parte interior y parte exterior, reduciendo así la distorsión creada en las operaciones de soldeo. Ver figura 32.

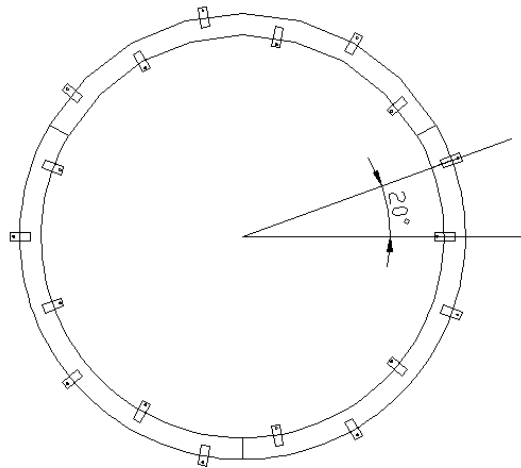


Figura 32: Posicionamiento de los útiles de sujeción en las almas de las cuadernas.

Para el posicionamiento de las planchas nos servimos de útiles manuales o hidráulicos, dependiendo de las dimensiones y peso de la estructura. En este caso se utilizan tensores y llaves de palanca.

Para conservar la precisión dimensional durante el soldeo, se utilizan elementos de sujeción. La sujeción de las previas a la mesa de soldadura se hace con unos elementos llamados sietes. Se introducen en los rieles de la mesa y se posicionan encima de las piezas sujetándolas con un tornillo con palometa como los aprietos de los talleres. Ver figura 33.

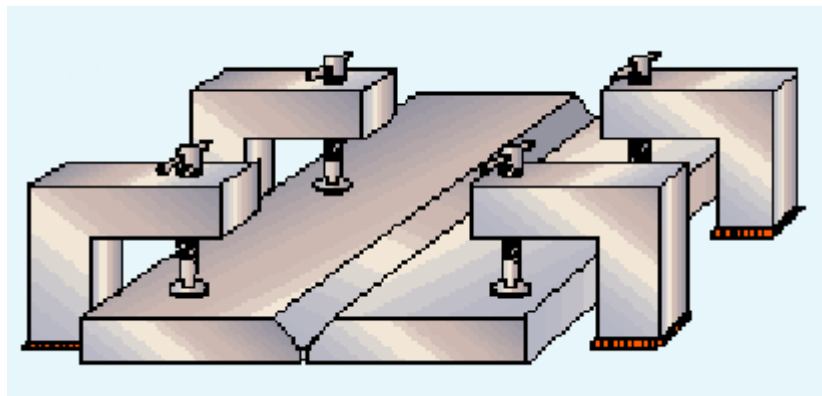


Figura 33: Elementos de sujeción. "Sietes". Fuente: Apuntes Sistemas de Construcción.

Una vez verificadas las dimensiones, se puntean mediante soldadura TIG las tres costuras de unión entre las previas del alma. Tras una comprobación final de dimensiones, se sueldan las costuras por



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



una cara con penetración completa mediante soldadura SAW. Los procedimientos de soldeo (etapa 9) se detallan en el apartado 11 “Soldadura” de este documento.

Montaje de la cuaderna (ala y alma): Sobre una mesa especial para el conformado de las cuadernas y anillos del casco (ver figura 34), se posiciona en horizontal el alma ya soldada de la cuaderna, calzada de tal forma que el montaje con las dos partes que conforman el ala sea el correcto. Para ello, se introducen bloques de madera o acero bajo el alma y se sujetan a la mesa de igual modo que para el montaje del alma posicionando todos los útiles por el exterior.



Figura 34: Mesa para el conformado de cuadernas y anillos. Fuente: Infodefensa.com

Las alas se posicionan de igual modo con elementos verticales que se introducen en la mesa y se posicionan con un tornillo con palometa contra el alma. Se ha de verificar que la posición de las soldaduras del alma y las soldaduras del ala no coincidan. Ver figura 35.

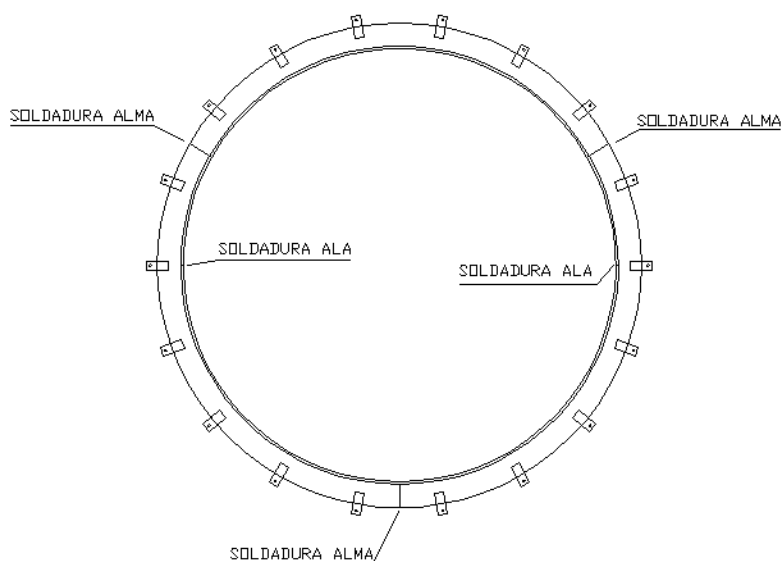


Figura 35: Posicionamiento de las previas que conforman una cuaderna



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



Se realiza el punteado con TIG y el posterior soldeo de las dos costuras en ángulo con SAW simultáneamente en una máquina automática con cilindros que gira la cuaderna durante la operación de soldeo (etapa 9), detallado en el apartado 11. “Soldadura” de este documento. Ver figura 36.



Figura 36: Soldadura SAW automática de una cuaderna. Fuente: P.Sosa.

10.6 NIVEL 3. FABRICACIÓN DE ANILLOS (ESLORAS 1.5-4 METROS).

En anillo constituye el producto intermedio clave para la construcción del casco de un sumergible. El armado de anillos permite realizar un ensamblaje parcial en un lugar separado de la zona del bloque principal y realizar así simultáneamente la construcción de varios anillos pertenecientes al mismo bloque.

En este nivel del proceso de fabricación se crean paneles bidimensionales mediante la unión de previas simples (forro del casco) y complejas (cuadernas). También se comienza con la construcción de los anillos resistentes (AR).

Los domos de proa y popa debido a su alta complejidad constructiva y la necesidad de maquinaria especial para su elaboración, serán adquiridos a empresas auxiliares del astillero asegurando así una entrega en el momento justo de construcción.

Montaje del anillo. Sobre una mesa de soldeo, se van posicionando las cuadernas que conforman el anillo a diferentes alturas, cada una en la posición que le corresponde.. Esto se realiza con unos brazos apoyados en un eje central (ver figura 34) que se encuentra solidario con la mesa y que permiten el posicionamiento y alineación de las cuadernas en la posición adecuada.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



Las cuadernas se mecanizan antes de posicionar el forro para garantizar el cumplimiento de las tolerancias constructivas y la circularidad máxima permitida.

Una vez se han comprobado las claras entre cuadernas y verificado la alineación de las mismas, se realiza el posicionamiento por el exterior de las cuadernas de la previa simple que forma el forro del casco. Esta previa está curvada 360°, pero no está cerrada ni soldada para facilitar el trabajo de posicionamiento.

Esta operación se realiza con ayuda de un puente grúa que hace descender la previa del forro verticalmente sobre la mesa de soldadura posicionándola de forma correcta con el conjunto de las cuadernas. Ver imagen 37.

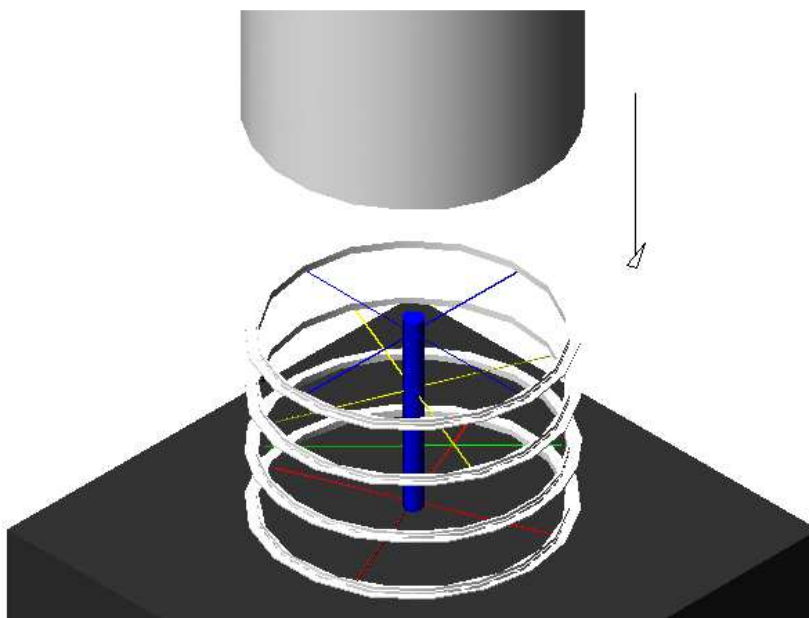


Figura 37: Posicionamiento de las previas de un anillo.

Posteriormente, con ayuda de unas eslingas de carraca, se cierra perfectamente (360°) la curvatura de la plancha del casco sobre las cuadernas. Con esta operación se obtiene el anillo con las dimensiones y tolerancias buscadas.

Es muy importante como se explicó en el apartado 7 “Estructura” de este documento el análisis dimensional del conjunto así como el control exhaustivo de la ovalización máxima permitida por el reglamento de GL en su Anexo B “Manufacturing Tolerances for the Pressure Hull. B.” de la norma aplicada para la construcción del sumergible (Ref. [1]).

Todo el conjunto se puntea mediante soldadura TIG. Cuando está punteado en su totalidad, el anillo compuesto por 5-6 cuadernas, se iza, se gira 90° y se coloca en posición horizontal sobre unos cilindros que facilitan la soldadura ya que permiten la rotación de todo el conjunto (Figura 38).



Figura 38: Soldadura automática de un anillo de cuadernas. Fuente: P.Sosa.

Igualmente que para la soldadura de las cuadernas, se utiliza soldadura SAW por una cara con penetración completa para las costuras en ángulo por ambos lados de la cuaderna y para la costura a tope longitudinal de unión de la plancha del forro.

Se pone especial atención durante el posicionamiento de la plancha del forro para no hacer coincidir la costura del mismo con ninguna costura del alma de la cuaderna. Así se evita el cruce de soldaduras y por tanto evitamos la concentración de tensiones en puntos del casco resistente. La disposición final de las costuras de todo el anillo es la representada en la siguiente imagen.

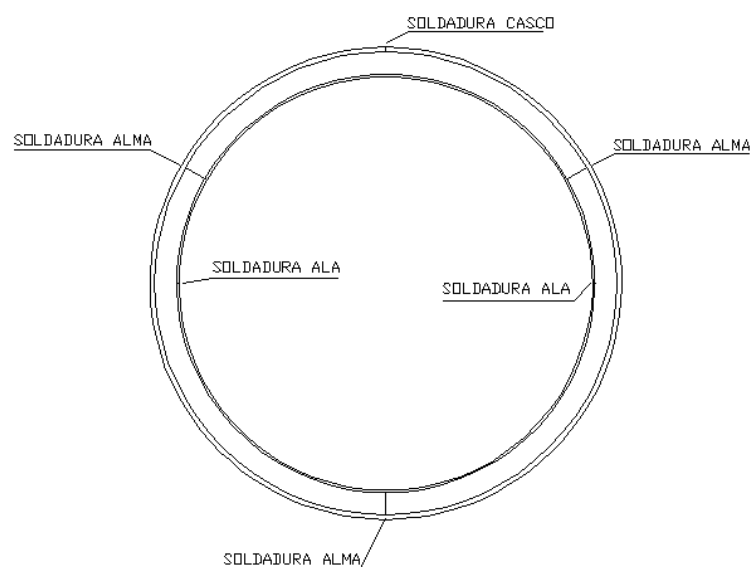


Figura 39: Disposición de las costuras de un anillo.

Estos anillos, una vez soldados y finalizadas sus etapas de construcción se aparcen en el taller en unas camas cilíndricas montadas sobre unas plataformas transportadoras a la espera de la finalización del resto de anillos que conforman cada bloque.

10.7 NIVEL 4. FABRICACIÓN DE BLOQUES (3-4 ANILLOS).

Los bloques son tridimensionales, de tamaños variables en función de su naturaleza y localización en el sumergible. Cada uno de los cuatro bloques que conforman el sumergible están contruidos por anillos (A) y anillos resistentes (AR), además, el bloque 1 (B1) de popa y el bloque 4 (B4) de proa albergan los domos de cierre. Un resumen de los anillos que conforman cada bloque se muestra en la siguiente figura.

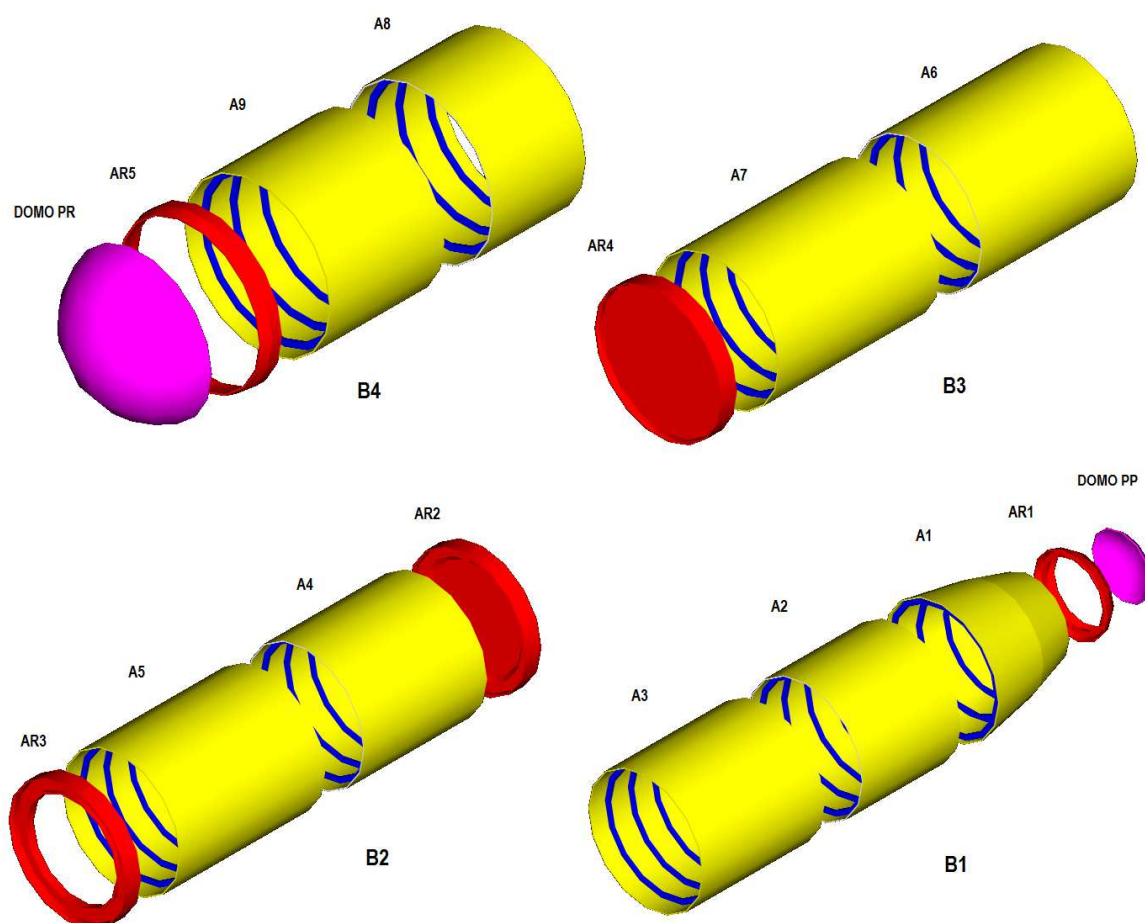


Figura 40: Despiece de los bloque en anillos constructivos.

El proceso de fabricación de bloques es relativamente sencillo una vez se tienen fabricados todos los anillos que componen cada bloque. Estos anillos son transportados con sus cunas hasta la zona de fabricación de bloques lo cual permite reunir en poco tiempo los componentes de cada bloque y alinearlos, calzarlos y posicionarlos de forma correcta con ayuda de las plataformas de transporte.

Al ser las esloras de los bloques: B1, 8.811 m; B2, 7.578 m; B3, 7.880 m; B4, 5.731 m, es abordable y segura la tarea de soldadura sobre rodillos giratorios. Primero, y tras posicionar los anillos a unir, se procede a realizar las tareas de punteado con TIG una vez comprobada la alineación y ovalización de los anillos.

Para la unión de bloques se utiliza soldadura automática SAW al igual que para la unión de los anillos. El procedimiento de soldeo es igual, ya que los anillos a unir se montan encima de unos cilindros que los hacen girar, mientras las máquinas de soldeo permanecen en posición bajo mano y sueldan perfectamente toda la costura a tope con penetración completa.

Tras la soldadura hay que asegurarse perfectamente de la alineación de las uniones y comprobar nuevamente que se cumple con los criterios máximos de ovalización de la norma GL. Para ello se pueden utilizar dispositivos rigidizantes durante la soldadura como el mostrado en la siguiente figura. (Figura 41).



Figura 41: Elemento rigidizante. Fuente: www.sindramas.com.

10.8 NIVEL 5. ENSAMBLADO DE BLOQUES Y SECCIONES.

Cuando el pre-armamento de los bloques ha alcanzado valores cercanos al 80-90% y todos los grandes módulos de equipos interiores se han realizado e instalado en el interior del casco resistente y se han recepcionado los domos de proa y popa, se procede a la unión entre bloques y la unión entre las dos secciones que componen el sumergible.

El esquema del flujo de construcción se ilustra en la siguiente figura:

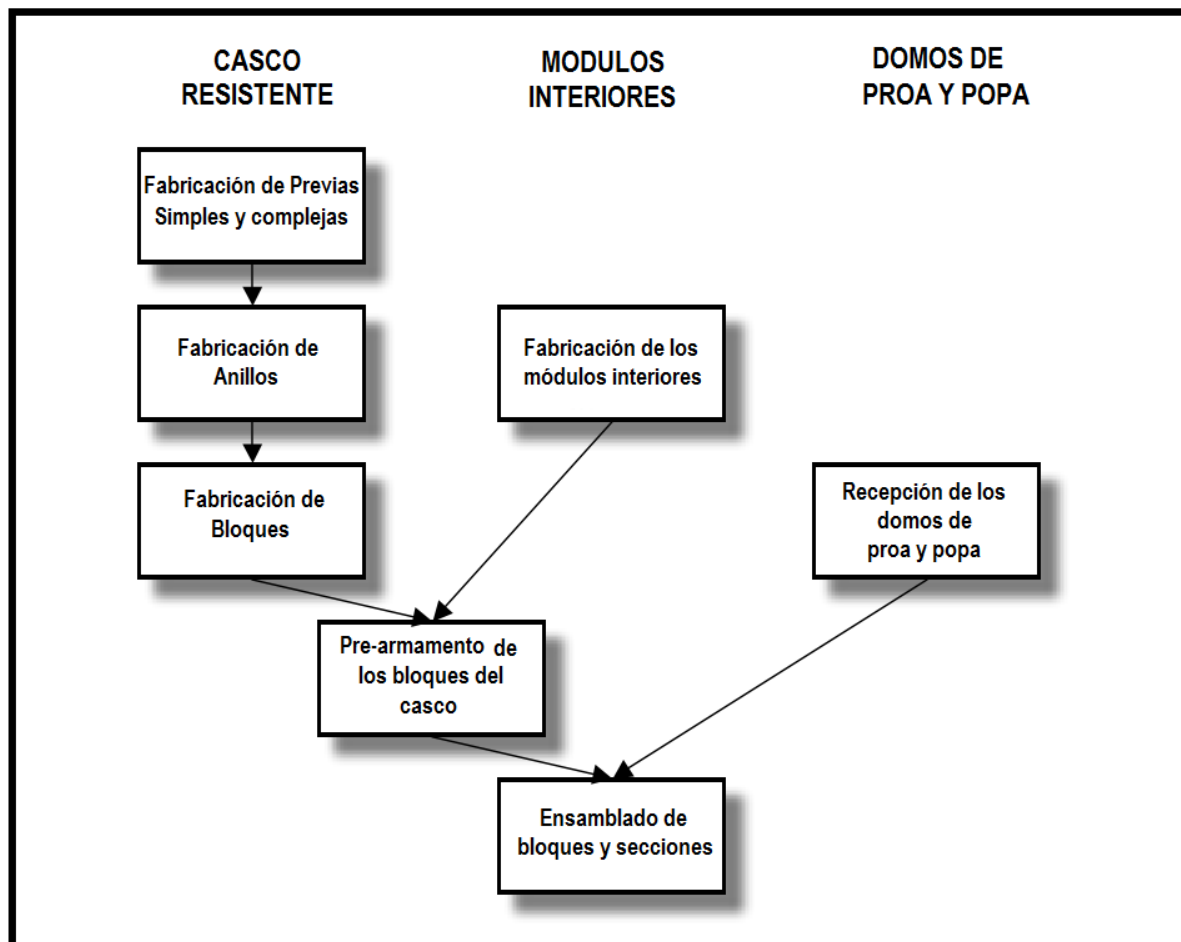


Figura 42: Esquema de construcción del sumergible.

Debido a que los bloques y posteriormente las secciones están armados con los diferentes equipos y sistemas necesarios del sumergible, es imposible realizar la tarea de soldadura sobre cilindros rotatorios. Por tanto, la forma de proceder ante esta dificultad añadida es:

- Posicionamiento de las secciones. Se realiza de la misma manera que la unión entre anillos, ya que los bloques y secciones se encuentran alojados en las cunas de construcción sobre las plataformas de transporte.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



- Punteado de las costuras de unión con soldadura TIG.
- Soldeo de las costuras con soldadura semiautomática con protección de gas activo (MAG). Esta soldadura multipasada con unión a tope. Este procedimiento de soldadura se detalla en la sección 11 “Soldadura” de este documento.

11. SOLDADURA



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



11.1 INTRODUCCIÓN

La aparición de nuevos materiales con características tecnológicas muy avanzadas ha conducido a la adopción de métodos y sistemas constructivos muy diversos con el fin de poder aprovechar las características más sobresalientes de estos. Un factor decisivo, que afecta a la concepción del tipo de estructura, es la soldabilidad de los materiales involucrados.

Los aceros de alto límite elástico, están teniendo una gran aceptación en el mercado en los últimos tiempos gracias al ahorro en peso que supone su uso, sin perder las propiedades mecánicas de la estructura en las que son usados.

Estos aceros surgen de la necesidad de conjugar una buena resistencia mecánica sin disminuir la soldabilidad, lo que comporta una disminución de carbono, compensando el decrecimiento de resistencia que esto implica, con la adición controlada de aleantes que ejerzan una acción directa sobre los mecanismos de crecimiento de grano.

Estos tipos de aceros son sometidos a un estricto control de sus parámetros de soldadura para asegurar una baja energía neta aportada en el cordón de soldadura, manteniendo de esta forma unos valores de tenacidad adecuados en la zona afectada por el calor. El control del tamaño de grano es fundamental en el resultado final de la unión.

La alta calidad de la soldadura, las elevadas tasas de deposición, la penetración profunda y la adaptabilidad a las operaciones automáticas, hacen que el proceso de soldadura SAW sea el más apropiado para la fabricación de ensamblajes soldados grandes de aceros de alto límite elástico. Haciendo el procedimiento de soldeo SAW el más utilizado en la fabricación de recipientes a presión, sumergibles y submarinos.

El control de las variables de operación del procedimiento de soldadura SAW es imprescindible para obtener tasas de producción elevadas y soldaduras de buena calidad. Estas variables, en orden aproximado de importancia, son las siguientes:

- Amperaje de soldadura. La corriente de soldadura es la variable que más influye porque controla la rapidez con que se funde el electrodo, y por tanto la tasa de deposición, la profundidad de penetración y la cantidad de metal base fundido.
- Tipo de fundente y distribución de las partículas. Hay tres tipos de fundentes.
 - Activos: Aquellos que contienen cantidades controladas de Manganeso y/o Silicio.
 - Neutros: Aquellos que no producirán ningún cambio significativo en la composición del metal de soldadura.
 - Aleados: Aquellos que se utilizan con electrodos de acero al carbono para obtener depósitos de soldaduras aleados
- Voltaje de la soldadura. El ajuste del voltaje de soldadura hace variar la longitud del arco entre el electrodo y el metal de soldadura fundido.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



- Velocidad de la soldadura. La penetración de la soldadura acusa más efecto por la velocidad de desplazamiento que por cualquier otra variable excepto la corriente.
- Tamaño del electrodo. Los electrodos de diámetro grande pueden transportar más corriente que los pequeños, y producir una tasa de deposición más alta a amperajes elevados.
- Anchura y espesor de la capa de fundente. La anchura y el espesor de la capa de fundente granular influye en el aspecto y la integridad de la soldadura terminada, así como en la acción de soldadura

El procedimiento de soldadura se encuentra reglado por la GL en su norma Rules for Classification and Construction . II, Materials and Welding. Part 3, Welding. Chapter 2, Design, Fabrication and Inspection of Welded Joints (Edition 2000), (Ref. [3]).

11.2 MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN SELECCIONADO

Dada la dificultad para encontrar suministradores (base de datos keytometals) con la especificación de acero exigencias por la sociedad de clasificación, apartado 8.2.1 “Material” de este documento, se ha optado por el suministrador ArcelorMittal ya que dispone de una amplia variedad de tamaños de planchas y un periodo de entrega de material reducido.

Dentro de la amplia gama de aceros de que dispone esta empresa, buscamos uno de alto límite elástico, templado y revenido (Q&T) tal y como indica la norma GL “II – Materials and Welding, Part 1 – Metallic Materials, Chapter 2, Section 1. (Ref. [4]).

El acero seleccionado para la construcción de todas las partes del casco resistente del sumergible es el acero tipo **SA-517 grado B** con un límite elástico de 690 N/mm² y con propiedades mecánicas similares y también, con una buena soldabilidad.

La comparativa entre ambos aceros se presenta en las siguientes tablas:

- Composición química (%):

	Acero Norma	Acero Seleccionado
	GL-F 690	SA-517 g. B
C	0.18 _{max}	0.13 – 0.23
Mn	1.70 _{max}	0.64 – 1.10
Si	0.55 _{max}	0.13 – 0.37
P	0.025 _{max}	0.035 _{max}



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



S	0.025 _{max}	0.035 _{max}
N	0.020 _{max}	-----
Cr	-----	0.36 – 0.69
Mb	-----	0.12 – 0.28
B	-----	0.0005 – 0.005
V	-----	0.02 – 0.09
Ti	-----	0.01 – 0.04

- Carbono equivalente (C_{eq}):

El carbono equivalente se calcula aplicando la fórmula que ampara los elementos que componen químicamente el acero con sus ponderados coeficientes de influencia en el agrietamiento durante la soldadura en relación al C.

$[C_{eq}] = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \text{ (%)}$		
SA-517 grado B	C_{eq}	0.40 – 0.53

- Propiedades mecánicas:

Acero	Límite elástico	Resistencia Tracción	Alargamiento
GL-F 690	690 N/mm ²	770 – 940 N/mm ²	14 - 16 %
SA-517 g. B	690 N/mm ²	790 – 930 N/mm ²	16 %

La especificación técnica del material se encuentra adjunta como anexo III en este documento y ha de ser aprobado por el GL.

Los aceros templados y revenidos, presentan un rango de temperaturas de aplicación comúnmente citadas en diferentes publicaciones comprendido entre -15°C y +45°C. La temperatura de las aguas en las que normalmente va a operar el sumergible es de +2°C, estando perfectamente encuadrado en el rango de temperaturas de aplicación del acero.

El tratamiento de templado y revenido (bonificado) aplicado por la empresa ArcelorMittal a las planchas consiste en:

Calentar la plancha de acero a la temperatura de austenización adecuada (900° C) manteniéndola a esa temperatura para permitir la transformación completa en austenita, a continuación se realiza el templado enfriándola rápidamente en agua.

Después del enfriamiento, el acero se reviene normalmente en un rango de temperaturas (200° C – 600° C). El propósito del revenido es aliviar tensiones internas y mejorar la ductilidad y la tenacidad de la plancha.

En resumen: el temple nos proporciona la estructura buscada y el revenido las propiedades mecánicas.

11.3 TIPOS DE UNIONES

La totalidad de las uniones a realizar en la construcción de la estructura del sumergible se agrupan en dos tipos, uniones a tope con bisel en forma de “V” y uniones en ángulo a 90° en forma de “T”.

Uniones a tope con bisel en forma de “V”. Esta preparación se realiza para la unión de las diferentes previas simples que conforman el alma de la cuaderna y para la unión de las planchas del forro entre sí y entre otros anillos, bloques y secciones. La simbología de este tipo de soldadura se puede apreciar en la siguiente figura.

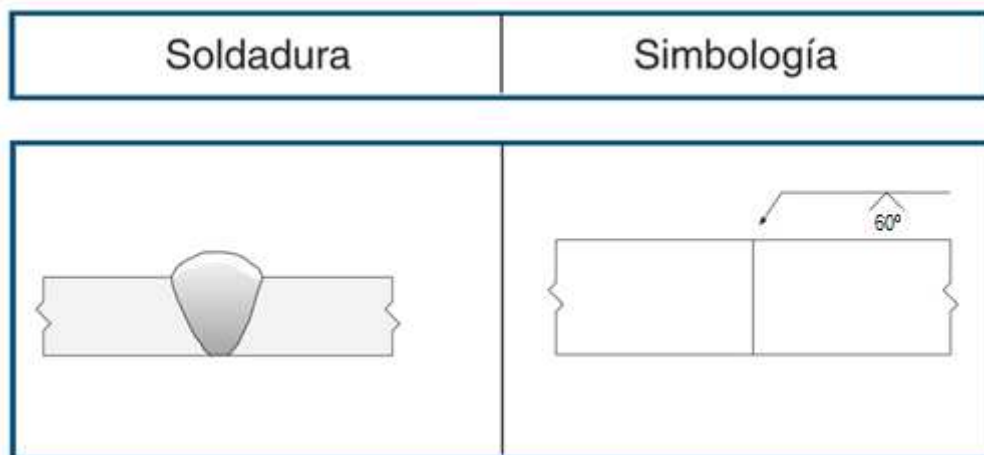


Figura 43: Simbología unión a tope con bisel en “V”. Fuente: Indura S.A.

La posición de soldeo para las uniones entre previas y anillos a tope con bisel es 1G y para la soldadura entre los diferentes bloques y secciones que forman el cilindro del casco resistente es 5G ya que no se puede rotar todo el conjunto.

Uniones en ángulo a 90° en forma de “T”. Estas uniones no precisan de ningún tipo de preparación de bordes. Son las uniones que se realizan entre el alma y el ala de la cuaderna y entre el alma y el forro

exterior del casco resistente. La posición de soldeo es 2F. La simbología de este tipo de soldadura se puede apreciar en la siguiente figura.

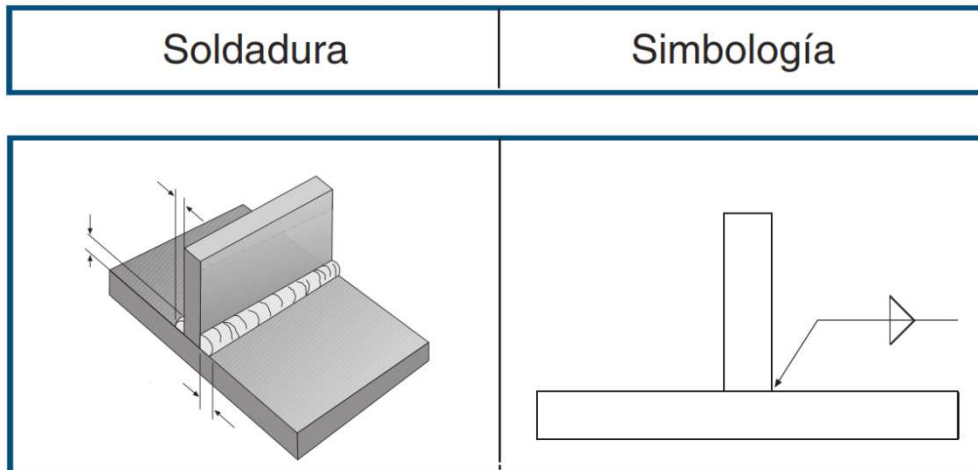


Figura 44: Simbología unión en ángulo a 90° en forma de "T". Indura S.A.

11.4 CÁLCULO DE LAS UNIONES SOLDADAS

Las uniones soldadas en ángulo se dimensionan para calcular la garganta de las mismas con el reglamento de la GL "Rules for Classification and Construction . II, Materials and Welding. Part 3, Welding. Chapter 2, Design, Fabrication and Inspection of Welded Joints (Edition 2000)" (Ref. [3]).

En la sección 1 "General design principles" apartado E "Dimensioning of welded joints" de la anterior norma se especifica el dimensionamiento y de las juntas soldadas.

Para uniones en ángulo, el espesor de la garganta del cordón "a" no será inferior a:

$$a = 0.5 * t \text{ [mm]}$$

Donde t, es el menor espesor de las planchas a unir en mm.

Sin poder ser inferior en ningún caso al calculado con la siguiente ecuación:

$$a_{min} = \sqrt{\frac{t_1 + t_2}{3}} \text{ [mm]}$$

Siendo t₁ el menor espesor y t₂ el mayor espesor de la unión.

La tabla resumen de las gargantas necesarias para las uniones en ángulo son las siguientes:

Elemento	Unión	Espesores (mm)		a (mm)	a _{min} (mm)
		t ₁	t ₂		
Cuaderna	Alma – Ala	15	25	7.5	3.65
	Alma – Forro	15	26	7.5	3.69
Bulárcama	Alma – Ala	25	40	12.5	4.65
	Alma - Forro	25	41	12.5	4.69

Las uniones a tope no es necesario calcularlas ya que vienen definidas por la preparación de la junta.

11.5 PROCESO DE SOLDEO

El proceso de soldeo seleccionado ha sido el sistema por arco sumergido (SAW), donde las principales ventajas que presenta son:

- El arco actúa bajo la capa de fundente, evitando salpicaduras y destellos.
- El proceso puede utilizarse con alta velocidad de soldadura y de deposición en posición sobremesa de superficies de chapas cilíndricas.
- El fundente actúa como desoxidante para eliminar contaminantes del baño fundido y producir soldaduras sanas, con buenas propiedades mecánicas. Además puede aportar, si se desea, elementos de aleación a la soldadura.
- Puede aplicarse en zonas expuestas al viento. El fundente granular ejerce una protección superior en estos casos que la obtenida por el recubrimiento del electrodo en el proceso SMAW o al gas en el proceso GMAW.
- Alta velocidad y rendimiento: Con electrodos de 4,0 mm y 4,8 mm a 800 y 1000 amperes, se logran depositar hasta 15 kg de soldadura por hora. Con electrodos de 6,4 mm y 1300 amperes, se depositan hasta 50 kg por hora (tres a cuatro veces más rápido que en la soldadura manual).

- Propiedades de la soldadura: Este proceso permite obtener propiedades comparables a las del metal base. Ya que pueden ajustarse perfectamente, y mantenerse constantes, los parámetros de soldeo.
- Proceso totalmente automático, aunque también se puede usar como procesos semiautomático.
- Rendimiento: 100%.
- Soldaduras homogéneas, de buen aspecto y penetración uniforme.

El arco eléctrico se genera entre un alambre desnudo (maciza o tubular), alimentado en forma continua y la pieza a soldar. La protección del arco se efectúa por medio de un fundente o flux (granulado o en polvo) que se alimenta a través de una tolva y que cubre totalmente el arco haciendo innecesaria la protección de la vista. Dicho flux se funde por el calor del arco, formando una protección eficiente, proveyendo de elementos desoxidantes y eventualmente elementos de aleación al baño metálico, (Ver figura 45).

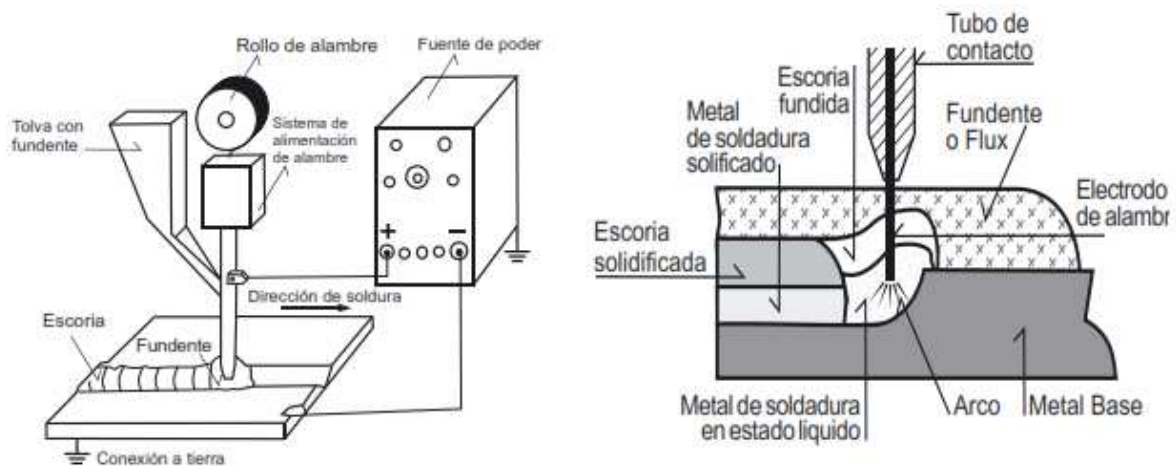


Figura 45: Esquema de proceso SAW. Fuente: ESAB.

Tanto el alambre como el fundente deben tener una composición química adecuada para que, en combinación, conformen un cordón de soldadura que cumpla con los requisitos exigidos

Usualmente se utiliza corriente continua con electrodo positivo, cuando se trata de intensidades inferiores a los 1000 amperios, reservándose el uso de corriente alterna para intensidades mayores, a fin de evitar el fenómeno conocido como sople magnético.

Generalmente contiene elementos desoxidantes, que junto a los que aporta el fundente, limpian las impurezas provenientes del metal base o de la atmósfera y aportan elementos de aleación



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



seleccionados según sean las características químicas y mecánicas del cordón de soldadura que se desee.

La clasificación de los alambres según la AWS (American Welding Society) se realiza mediante dos letras y dos dígitos, que indican la composición química.

EX	XX
letras	dígitos

Las dos primeras letras indican:

- ✓ 1ª letra, "E": Significa electrodo para soldadura por arco.
- ✓ 2ª letra, "X": Significa el contenido máximo de manganeso.
 - L: 0.60% Mn max. (bajo contenido en manganeso).
 - M: 1.25% Mn max. (contenido medio de manganeso).
 - H: 2.25% Mn max. (alto contenido en manganeso).

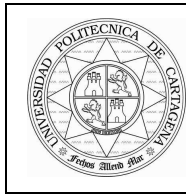
Los dos dígitos indican los porcentajes medios de carbono:

Parte del flux se funde con un papel similar al del recubrimiento en los electrodos revestidos: protege el arco, lo estabiliza, genera una escoria de viscosidad y tensión superficial adecuadas e incluso permite añadir elementos de aleación o compensar la pérdida de ellos. El resto de flux, no fundido, puede recuperarse y reciclarse en el proceso.

Según la AWS el fundente (o flux) es clasificado en base a las propiedades mecánicas del depósito, al emplear una determinada combinación fundente/alambre.

F	X	X	X	-	E	X	X	X
1	2	3	4					Alambre

- ✓ 1 - Indica fundente.
- ✓ 2 - Indica la resistencia mínima a la tracción que debe ser obtenida en el metal depositado con el fundente y electrodo utilizado.
- ✓ 3 - Indica la condición de tratamiento térmico en que el depósito fue sometido a ensayo:
 - A: Sin tratamiento térmico.
 - P: Con tratamiento térmico. Recocido a $620 \pm 15^\circ\text{C}$ durante 1 hora.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



- ✓ 4 – Indica temperatura más baja (en °C) a la cual el metal depositado tiene una resistencia al impacto igual o mayor a 27 Julios.
 - Z: No hay requerimientos.
 - 0,2,4,5,6: Indican distintas temperaturas de ensayo.
 - 0: (-18°C).
 - 2: (-29°C).
 - 4: (-40°C).
 - 5: (-46°C).
 - 6: (-51°C).
 - 8: (-62°C).

11.6 SOLDABILIDAD, DIRECTRICES DEL FABRICANTE

La soldadura es de importancia crítica en la fabricación de estructuras de acero. Los aceros estructurales más populares son fácilmente soldables con prácticas de taller bien establecidas. Sin embargo, y bajo una serie de circunstancias, incluyendo el grado de acero, consumibles de soldadura utilizados, diseño de la junta de soldadura o condiciones ambientales, pueden producirse agrietamientos en las soldaduras.

Una manera popular para identificar aceros potencialmente susceptibles a sufrir un agrietamiento es para calcular el carbono equivalente (Ce). Sin embargo, esto es sólo un primer paso para hacer frente a una situación susceptible de agrietamiento en una soldadura.

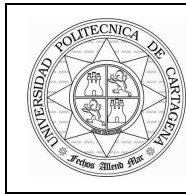
Nos centramos en tratar el agrietamiento producido por introducción de hidrógeno ya que es el fallo con mayor frecuencia en la soldadura de estructuras fabricadas a partir de este tipo de acero.

Las grietas se producen en la soldadura y el metal base cuando las tensiones localizadas exceden la resistencia a la rotura y / o la tenacidad del material. Estas grietas pueden estar en la dirección longitudinal o transversal con respecto al eje de soldadura y, en general se dividen en dos categorías:

Grietas en caliente: se desarrollan a temperaturas elevadas, es decir, que comúnmente se forman durante la solidificación del metal de soldadura.

Grietas o fisuras en frío, "retardada", se desarrollan después de la solidificación de la zona de fusión como resultado de las tensiones residuales. Las grietas en frío se forman generalmente a una temperatura por debajo de 93 ° C, a veces varias horas, o incluso días, después de la soldadura. El tiempo de retardo depende del tipo de acero, la magnitud de las tensiones de soldadura y el contenido de hidrógeno de la soldadura y la zona afectada térmicamente (ZAT).

La fisuración retardada normalmente se asocia con el hidrógeno disuelto y puede ocurrir en el metal de soldadura, en general, cuando se utilizan metales de relleno con los niveles de fuerza de alto



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



rendimiento, o en la zona afectada térmicamente del metal de base debido a la difusión de hidrógeno a partir del metal de soldadura al metal base durante el proceso de soldadura.

El hidrógeno puede ser absorbido de la atmósfera en grandes cantidades. Cuando se enfría el acero, que retiene menos hidrógeno que en solución, "rechaza" el exceso de hidrógeno. Cuando el acero se enfría lentamente, los átomos de hidrógeno pueden escaparse a la atmósfera por el proceso conocido como difusión. Sin embargo, un enfriamiento rápido, asociado con la mayoría de los procesos de soldadura, tiende a "atrapar" el hidrógeno, fragilizando y debilitando la estructura del acero.

Durante el proceso de soldadura, el hidrógeno puede entrar en el baño de soldadura fundida a partir de una variedad de fuentes. Estas fuentes incluyen:

- La humedad, aceite, grasa, óxido o escoria sobre las superficies de los metales básicos.
- La humedad en la atmósfera (días lluviosos o húmedos), que permite la infiltración de humedad en la atmósfera de blindaje que rodea la zona del arco.
- La humedad en el revestimiento del electrodo, flux o de los ingredientes básicos de alambre con núcleo de fundente.
- La humedad en el flux de la soldadura por arco sumergido.

Los daños producidos por el hidrógeno (formación de grietas) pueden reducirse al mínimo mediante el establecimiento y la aplicación de las prácticas y procedimientos de soldadura que impiden que el exceso de hidrógeno entre en el charco de soldadura. Mediante la adopción de medidas que permiten que cualquier hidrógeno disuelto se difunda lentamente. Los métodos típicos para lograr esto son:

- Limpieza a fondo del metal base (área del cordón y adyacentes) por medios mecánicos o cepillado.
- El uso exclusivo de electrodos de bajo hidrógeno y / o procesos de soldadura bajo hidrógeno.
- Secado adecuado y el almacenamiento de electrodos de soldadura, fundentes y el mantenimiento adecuado de los equipos como alimentadores de alambre.
- El empleo de una combinación de soldadura y tratamientos térmicos que promueven el escape de hidrógeno por difusión.
 - El precalentamiento y el mantenimiento de la temperatura mínima entre pasadas.
 - Enfriamiento lento o el post-calentamiento después de la soldadura.

Siendo las prácticas recomendadas por el fabricante ArcelorMittal para la realización de soldaduras con bajo hidrógeno las siguientes:

- Eliminar el aceite, grasa y la suciedad del alambre de soldeo.
- Los fundentes básicos permiten realizar depósitos de soldadura con bajos niveles de hidrógeno (menos de 5 ml/100 g), particularmente útiles para aceros de alto límite elástico.
- El fundente de SAW debe estar seco y libre de contaminación, suciedad, cascarilla de laminación u otros materiales extraños.
- El fundente debe ser comprado en paquetes que se pueden almacenar durante al menos seis meses, en condiciones normales, sin afectar a las características o propiedades de soldadura.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



- El fundente de un paquete dañado debe ser desechado o secado antes de su uso en un horno ventilado, usando las recomendaciones del proveedor; generalmente hornear a 370-430 ° C durante un mínimo de una hora.
- El fundente debe ser colocado en el sistema de dispensación inmediatamente después de la apertura de un paquete.
- cuando se utiliza el fundente de un paquete abierto, la pulgada superior debe ser desechada.
- El fundente reutilizado o recuperado, debe secarse como se describe anteriormente antes de volverla a usar.

Precalentamiento.

A pesar de todos los controles descritos anteriormente para minimizar hidrógeno en los aceros con alto contenido en carbono (más de 0,30% C), los aceros aleados, los aceros de límite elástico, las placas gruesas (mayores de 25 mm) o piezas soldadas altamente restringidas, pueden requerir precalentamiento para evitar grietas o fisuras debido a hidrógeno.

El propósito principal de precalentamiento es retardar la velocidad de enfriamiento en la zona afectada por el calor y el metal de soldadura. En las soldaduras de múltiples pasadas, las pasadas posteriores se pueden depositar en el metal que ha sido precalentado por el cordón que le precede, pero el primero y más importante se deposita en el acero frío a menos que se adopte un procedimiento de precalentamiento. El precalentamiento tiene las ventajas de:

- Secado de la junta y retirado de la humedad retenida.
- Quemar cualquier compuesto orgánico.
- El aumento de la velocidad de difusión del hidrógeno.
- Disminuir la velocidad de enfriamiento soldadura.

Las temperaturas de precalentamiento utilizadas están basadas en la experiencia o los códigos, como la AWS D1.1 y D1.5, siendo necesario se cálculo dependiendo de la composición específica de cada acero y espesor.

Para esta familia de aceros es práctica normal fijar un valor máximo de 0.43% para el carbono equivalente.

Por tanto, para el acero utilizado, SA-517 grado B, con unos valores típicos de carbono equivalente entre 0.4 y 0.53, se hace necesario un precalentamiento y mantener una temperatura entre pasadas de soldadura de 70°C tal y como indica el proveedor ArcelorMittal. ANEXO III "Especificación técnica del material" de este documento.

Realizando el cálculo del precalentamiento necesario utilizando el método del Índice de Brusquedad Térmica (IBT) del Instituto Internacional de Soldadura (Soldadura de los aceros: Aplicaciones, de Manuel Reina Gómez), para un C_e de 0.53 y las variables de soldadura indicadas en los WPS, se obtiene un precalentamiento y temperatura entre pasadas de 100°C.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



Tratamiento térmico post-soldeo. PWHT.

Las mismas piezas soldadas gruesas, de alto límite elástico o restringidas que pueden requerir calentamiento para un enfriamiento lento y / o tratamiento térmico posterior a la soldadura (PWHT).

Esta combinación de calor de precalentamiento/post-calentamiento sirve para el propósito de reducir las tensiones residuales, permitir la difusión de hidrógeno disuelto y la modificar la microestructura de la zona afectada térmicamente para hacerla más resistente a la fisuración.

Los métodos más comunes de enfriamiento lento implican el mantenimiento de la temperatura mínima del cordón de soldadura durante varias horas después de que la soldadura se ha completado y / o envolver la pieza soldada completamente con una manta aislante para retardar la velocidad de enfriamiento.

Información más detallada de la soldabilidad recomendada por ArcelorMittal del acero SA-517, se aporta en el ANEXO III "Especificación técnica del material" de este documento.

11.7 VARIABLES DE SOLDADURA Y PROCEDIMIENTOS DE SOLDEO

Los procedimientos de soldeo más importantes y repetidos durante todo el ciclo de construcción del casco resistente se catalogan como muestra la siguiente tabla, donde también se representa la preparación de la unión.

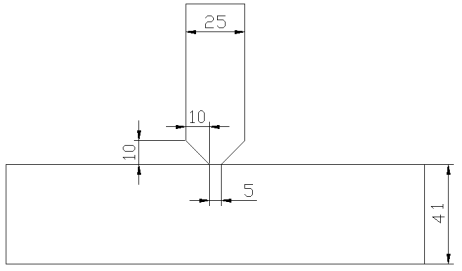
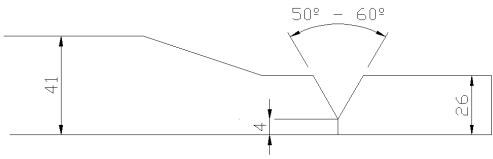
	Unión	Procedimiento	Croquis
I	<i>Previas alma de la cuaderna</i>	SAW	
II	<i>Alma - ala cuaderna</i>	SAW	



**Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un
sumergible independiente mediante el reglamento de
clasificación del GL**



III	<i>Alma cuaderna – casco</i>	SAW	
IV	<i>Planchas del casco</i>	SAW	
		MAG	
V	<i>Previas alma bulárcama</i>	SAW	
VI	<i>Alma – ala bulárcama</i>	SAW	

VII	<i>Alma bulárcama – casco</i>	SAW	
VII	<i>AR – casco</i>	SAW	

Donde los parámetros más importantes que varían el resultado de una soldadura con el proceso de arco sumergido son:

- Intensidad.
- Voltaje.
- Polaridad.
- Diámetro del alambre.
- Velocidad de avance de la soldadura.

Y los parámetros secundarios que producen efectos en el resultado de la soldadura y se usan para optimizar el proceso, son:

- Altura de fundente.
- Longitud libre del hilo o alambre.
- Posición del electrodo.
- Preparación de la junta.
- Soporte o respaldo.

Por último, se crean los documentos de los procedimientos de soldeo (WPS) de acuerdo a la Sección IX del código ASME “Para la elaboración y cualificación de procedimientos”, (Ref. [13]).



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



DGR S.A		PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (Según Código ASME Sección IX)				Hoja 1 de 2	
PROCEDIMIENTO (WPS) N°: 1			Revisión: 1		Fecha: 20/09/2013		
INFORMES DE CUALIFICACION (PQR) N°s:					Fecha:		
PROCESO(S) DE SOLDADURA: SAW			TIPO(S): AUTOMÁTICO				
QW-402 JUNTAS							
Diseño básico de la junta: A tope en V (Ver detalle en hoja 2)							
Respaldo o soporte de raíz: NO							
Material del respaldo:							
QW-403 MATERIALES BASE							
N.º P	Grupo	Especificación	Tipo	Clase	Grado		
11B	4	SA	517		B		
11B	4	SA	517		B		
ANÁLISIS QUÍMICO: 0.5Cr-0.2Mo-V			PROPIEDADES MECANICAS:				
ESPESOR		Material Base: 1.5 mm - 30 mm	Material Aportado: Ninguna pasada será superior a 13 mm				
LÍMITES DE DIÁMETRO EN TUBERÍA:							
OTROS:							
QW-404 MATERIAL DE APORTE C 0,04%; Mn 1,54%; Si 0,32%; P 0,013%; S 0,010%; Cr 0,30%; Ni 1,86%; Mo 0,40%							
Tipo	Nº F	Nº A	Esp. SFA	Clase AWS	Diámetros	Designación com.	
Varilla	6	-----	5.23	F7A0 - EM12K	4 mm	-----	
Rango de espesores							
E11018-M	Máximo 15 mm						
COMBINACION ELECTRODO/FUNDENTE EM12K - H400							
AROS CONSUMIBLES: N/A							
OTROS: --							
QW-405 POSICIONES			QW-406 PRECALENTAMIENTO				
Posición: 1G				Tº mínima Tº entre pasadas: Mantenimiento del prec.	Pasada raíz 100 °C 100 °C Si	Resto de pasadas 100 °C 100 °C Si	
Progresión		Tipo pasada					
SAW - Rotación de tubería							
QW-407 TRATAMIENTO TÉRMICO			QW-408 GASES DE PROTECCION				
Límites de la temperatura de mantenimiento:		SIN PWHT		Tipos de gases: N/A			
Tiempo de mantenimiento:		N/A		Composición: N/A			
Otros:				Caudal: N/A			
				Gas de respaldo: N/A			
				Gas adicional: N/A			



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



DGR S.A			PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (Según Código ASME Sección IX)				Hoja 2 de 2		
PROCEDIMIENTO (WPS) N°: 1			Revisión: 1		Fecha: 20/09/2013				
QW-409 CARACTERISTICAS ELECTRICAS			QW-410 TECNICA						
<p align="center">F7A0 - EM12K</p> <p>Límite de input térmico</p> <p>Arco pulsado N/A</p> <p>Tipo de corriente DC</p> <p>Polaridad E+</p> <p>Límites de intensidad (A) 400 - 650</p> <p>Tipo electrodo no consumible N/A</p> <p>Tamaño electrodo no consumible (mm) N/A</p>			<p align="right">SAW RECTA</p> <p>Pasada recta/oscilante</p> <p>Diámetro boquilla (mm) N/A</p> <p>Método de limpieza inicial/ entre pasadas CEPILLADO Y AMOLADO</p> <p>Método de resanado de raíz PIEDRA ESMERIL</p> <p>Pasada simple/multipasada MULTIP.</p> <p>Electrodo único/múltiple</p> <p>Martilleado NO</p>						
CROQUIS DE DIMENSIONES			ORDEN DE SOLDADURA						
Lado	Pasada N°	Proceso	Material de aporte		Corriente				Velocidad cm/min
			electrodo	Diámetro (mm.)	Tipo (DC/AC)	Polaridad (+/-)	Intensidad (A)	Tensión (V)	
	1	SAW	F7A0 - EM12K	4	DC	E+	400 - 650	28 - 32	30 - 70
	2	SAW	F7A0 - EM12K	4	DC	E+	400 - 650	28 - 32	30 - 70
	RESTO	SAW	F7A0 - EM12K	4	DC	E+	400 - 650	28 - 32	30 - 70
					Fabricante:				
					SUBMARINE S.A				



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



DGR S.A		PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (Según Código ASME Sección IX)				Hoja 1 de 2	
PROCEDIMIENTO (WPS) N°: 2			Revisión: 1		Fecha: 20/09/2013		
INFORMES DE CUALIFICACIÓN (PQR) N°s:					Fecha:		
PROCESO(S) DE SOLDADURA: GMAW				TIPO(S): SEMI-AUTOMÁTICO			
QW-402 JUNTAS							
Diseño básico de la junta: A tope en V (Ver detalle en hoja 2)							
Respaldo o soporte de raíz: NO							
Material del respaldo:							
QW-403 MATERIALES BASE							
N.º P	Grupo	Especificación	Tipo	Clase	Grado		
11B	4	SA	517		B		
11B	4	SA	517		B		
ANÁLISIS QUÍMICO: 0.5Cr-0.2Mo-V				PROPIEDADES MECÁNICAS:			
ESPESOR		Material Base: 1.5 mm - 30 mm		Material Aportado: Ninguna pasada será superior a 13 mm			
LÍMITES DE DIÁMETRO EN TUBERÍA:							
OTROS:							
QW-404 MATERIAL DE APORTE							
Tipo	Nº F	Nº A	Esp. SFA	Clase AWS	Diámetros	Designación com.	
Varilla	6	2	5.28	ER110S-1	1.2 mm	-----	
Rango de espesores							
ER110S-1	TODO						
COMBINACION ELECTRODO/FUNDENTE							
AROS CONSUMIBLES: N/A							
OTROS: --							
QW-405 POSICIONES				QW-406 PRECALENTAMIENTO			
Posición: 5G					Pasada raíz	Resto de pasadas	
Progresión		Tipo pasada		Tº mínima	100 °C	100 °C	
GMAW - Sin Rotación				Tª entre pasadas:	100 °C	100 °C	
				Mantenimiento del prec.	Si	Si	
QW-407 TRATAMIENTO TÉRMICO				QW-408 GASES DE PROTECCIÓN			
Límites de la temperatura de mantenimiento: SIN PWHT				Tipos de gases:			
Tiempo de mantenimiento: N/A				Composición: 75 Ar/ 25 CO2			
Otros:				Caudal: 12 - 14 l/min			
				Gas de respaldo: N/A			
				Gas adicional: N/A			



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



DGR S.A		PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (Según Código ASME Sección IX)				Hoja 2 de 2			
PROCEDIMIENTO (WPS) N°: 2		Revisión: 1		Fecha: 20/09/2013					
QW-409 CARACTERISTICAS ELECTRICAS		QW-410 TECNICA							
<p>ER110S-1</p> <p>Límite de input térmico</p> <p>Arco pulsado N/A</p> <p>Tipo de corriente DC</p> <p>Polaridad E+</p> <p>Límites de intensidad (A) 180 - 220</p> <p>Tipo electrodo no consumible N/A</p> <p>Tamaño electrodo no consumible (mm) N/A</p>		<p align="right">GMAW</p> <p>Pasada recta/oscilante RECTA</p> <p>Diámetro boquilla (mm) N/A</p> <p>Método de limpieza inicial/ entre pasadas CEPILLADO Y AMOLADO</p> <p>Método de resanado de raíz PIEDRA ESMERIL</p> <p>Pasada simple/multipasada MULTIP.</p> <p>Electrodo único/múltiple</p> <p>Martilleado NO</p>							
CROQUIS DE DIMENSIONES		ORDEN DE SOLDADURA							
Lado	Pasada N°	Proceso	Material de aporte		Corriente				Velocidad cm/min
			electrodo	Diámetro (mm.)	Tipo (DC/AC)	Polaridad (+/-)	Intensidad (A)	Tensión (V)	
	1	GMAW	ER110S-1	1.2	DC	E+	180 - 220	30 - 34	
	2	GMAW	ER110S-1	1.2	DC	E+	180 - 220	30 - 34	
	RESTO	GMAW	ER110S-1	1.2	DC	E+	180 - 220	30 - 34	
					Fabricante:				
					SUBMARINE S.A				

12. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



Referencias

- [1] Rules for Classification and Construction. I, Ship Technology. Part 5, Underwater Technology. Chapter 2, Manned Submersibles. (Edition 2009).
- [2] Specification for pressure vessel plates, alloy steel, high-strength, quenched and tempered. SA-517/SA-517M, Section II, Part A. (2008)
- [3] Rules for Classification and Construction . II, Materials and Welding. Part 3, Welding. Chapter 2, Design, Fabrication and Inspection of Welded Joints (Edition 2000).
- [4] Rules for Classification and Construction . II, Materials and Welding. Part 1, Metallic Materials. Chapter 2, Steel and Iron Materials (Edition 2009).
- [5] Rules for Classification and Construction . III Naval Ship Technology. Part 2, Sub-Surface Ships. Chapter 1, Submarines. (Edition 2008).
- [6] Rules for Classification and Construction . III Naval Ship Technology. Part 1, Surface Ships. Chapter 1, Submarines. (Edition 2008).
- [7] ILLC 66 – International Convention on Load Lines, 1966, as amended.
- [8] MARPOL 73/78 – International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973 including the 1978 Protocol as amended.
- [9] SOLAS 74 – International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974, as amended.
- [10] LSA – International Life-Saving Appliances Code issued by IMO in actual versión.
- [11] COLREGS 1972 – International Regulations of 1972 to prevent collisions at sea.
- [12] MSC/Circ. 98 – Guidelines for the Design, Construction and Operation of Passenger Submersible Craft according to IMO MSC/Circ. 981 of 29 January 2001.
- [13] Código ASME, Sección IX “Para la elaboración y cualificación de procedimientos”.
- [14] Código ASME, Sección II. “ Para la especificación de material base y electrodos”.

Bibliografía escrita.

- Artículo técnico. Construcción Integrada. Construcción de submarinos. Alberto Hermoso Trigo, Ing. Naval. 1999.
- Artículo técnico. El casco resistente con formas de oruga para submarinos. E. Vollbrecht. Prof de la RWTH Aachen.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



- Artículo técnico. Conocimientos generales de los submarinos. Escuela de submarinos “Alte. García de los Reyes”.
- Artículo técnico. Fundamentos de la soldadura por arco eléctrico. ESAB.
- Artículo técnico. La conquista del fondo del mar. Museo marítimo de Barcelona. 2010.
- MIL-STD-1689A. Fabrication, welding, and inspection of ships structure. Department of defense. United States of America.
- Artículo técnico. Elementos a considerar en las inspecciones a sumergibles. J. Medina Castillo. Drc, Ing. Naval.
- Soldadura de los aceros: Aplicaciones (4ª edición actualizada con referencias europeas). Manuel Reina Gómez. 2003.
- Seminario de submarinos. UPCT. Dr Ing, Naval P. Sosa. 03-2007.
- Artículo técnico. La conquista del fondo del mar. Evolución histórica de sumergibles.
- Artículo técnico. Manual de soldadura & catálogo de Productos. Oerlikon.
- Artículo técnico. Manual de sistemas y materiales de soldadura. Indura S.A.
- Artículo técnico. Guidelines for fabrication and processing plate Steel. MITTAL.

Bibliografía en internet.

- www.monografias.com
- elmundooceanico.blogspot.com
- www.amarre.com
- www.plocan.eu
- [www. Solysol.com.es](http://www.Solysol.com.es)
- www.ArcelorMittal.com
- www.infodefensa.com
- www.keytometals.com

ANEXO I – CALCULATION OF THE PRESSURE HULL



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



Annex A

Calculation of the Pressure Hull

A. General

1. Introduction

1.1 In the following a calculation method is described which investigates the stress and stability situation in the pressure hull for the load cases I, II and III with the pressures:

- nominal diving pressure **NDP** (load case I according to GL Rules for [Manned Submersibles \(I-5-2\), Section 4, E.](#))
- collapse diving pressure **CDP** (load case II)
- test diving pressure **TDP** (load case III)

In the following the method of calculation for stiffened cylindrical shells is presented. For unstiffened cylindrical shells with dished ends the calculations are analogously performed for the sectional area of the stiffening ring $A_{\text{eff}} = A_F = 0$, whereas the buckling length is limited by the dished ends. If the buckling length is limited by dished ends, 40 % of the curve depth is to be added for each dished end to the cylindrical length.

The method of calculation presented takes account of manufacturing related deviations from the ideal form of the shell (e.g. out-of-roundness). The manufacturing tolerances defined in [Annex B](#) have to be applied for the calculation.

1.2 Conical shells are calculated in sections, each of which is treated like cylindrical shells.

1.3 The overall collapse of the construction is regarded as buckling of the pressure hull between bulkheads, web frames and dished ends.

For the states of stability described, proof is required of sufficient safety in respect to the particular form of damage concerned.

1.4 When using the method of calculation it is to observe, that both elastic and elastic-plastic behaviour can occur in the materials of the shell structure and the frames.

It is generally the case that:

- at nominal diving pressure, the stress is within the purely elastic range of the material
- at test diving pressure, the stress may lie at the commencement of the elastic-plastic range of the material

- but for calculation against exceeding of the permissible stress elastic material behaviour of the material can be assumed
- at collapse diving pressure, the stress may lie in the elastic or the elastic-plastic range of the material

1.5 When calculating a pressure hull the calculation data are to be introduced according to the planned operating conditions under consideration of GL Rules for [Manned Submersibles \(I-5-2\), Section 5, D.](#)

1.6 Pressure hulls subjected to internal overpressure are to be calculated in addition according to the GL Rules for [Machinery Installations \(I-1-2\), Section 8.](#)

2. Longitudinal strength

For the longitudinal strength of the pressure hull the longitudinal bending moments and shear forces are to be considered. It is to be checked only on request of GL.

3. Vessels similar to the pressure hull

For vessels which are partly or totally arranged like the pressure hull and from which the safety of the submersible depends in the same way, like e.g. entrance trunk, containers for rescue equipment, etc., the same proofs have to be carried out as for the pressure hull.

4. Acrylic windows

The requirements for design and manufacturing of acrylic windows are defined in [Annex C.](#)

B. Fatigue Strength

1. Proof of fatigue strength has to be carried out for load case I determined by nominal diving pressure **NDP** according to the GL Rules for [Manned Submersibles \(I-5-2\), Section 4, B.2.1.](#) resp. [Unmanned Submersibles \(ROV, AUV\) and Underwater Working Machines \(I-5-3\), Section 3, C.1.6.1.1.](#)

2. The proof of stresses is to be based on the nominal geometry.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



3. For the calculation of the stresses in the pressure hull, the following influences have to be considered with sufficient accuracy:

- increase of stress at frames, web frames, bulkheads and tripping/transition rings
- increase of stress at penetrations
- disturbances of the state of stress because of connection with pressure-proof extensions

C. Stresses at Nominal Diving Pressure

1. Proof of stress has to be carried out for load case I characterized by nominal diving pressure **NDP** according to the Rules for [Manned Submersibles \(I-5-2\), Section 4, B.2.1](#) respectively [Unmanned Submersibles \(ROV, AUV\) and Underwater Working Machines \(I-5-3\), Section 3, C.1.6.1.1](#).

2. For the calculation of the stresses in the pressure hull the stress limits are defined in the Rules for [Manned Submersibles \(I-5-2\), Section 5, D.3](#).

3. The proof of stress has to be performed using the methods in [F.1.](#), [F.6.2](#), [F.4.4](#) (formula A59), [F.7.2](#) and [F.7.4](#).

D. Stresses at Test Diving Pressure

1. Proof of stresses has to be carried out for load case III characterized by test diving pressure **TDP** according to GL Rules for [Manned Submersibles \(I-5-2\), Section 4, B.2.2](#) respectively [Unmanned Submersibles \(ROV, AUV\) and Underwater Working Machines \(I-5-3\), Section 3, C.1.6.1.3](#).

2. For the calculation of the stresses in the pressure hull the stress limits are defined in the GL Rules for [Manned Submersibles \(I-5-2\), Section 5, D.3](#).

3. For nominal diving pressures of at least 10 bar proof of strength for load case III can be omitted.

4. The proof of stress has to be performed using the methods in [F.1.](#), [F.6.2](#), [F.4.4](#) (formula A59), [F.7.2](#) and [F.7.4](#).

E. Proof of Ultimate Strength at Collapse Diving Pressure

1. The proof of ultimate strength has to be carried out for load case II characterized by the collapse diving pressure **CDP** according to the GL Rules for

[Manned Submersibles \(I-5-2\), Section 4, B.2.3](#) respectively [Unmanned Submersibles \(ROV, AUV\) and Underwater Working Machines \(I-5-3\), Section 3, C.1.6.1.2](#) as proof of stability and stress.

For the following types of failure it has to be proven that the pressures for a failure are greater or equal to the collapse diving procedure:

- symmetric buckling between the frames
- asymmetric buckling between the frames
- general instability under consideration of the partial effect of the web frames
- tilting of the frames
- buckling of the dished ends and spheres
- local yielding in the area of discontinuities

2. For the calculation of the stresses in the pressure hull the stress limits are defined in the Rules for [Manned Submersibles \(I-5-2\), Section 5, D.3](#).

3. The proof of stress has to be performed using the methods in [F.1.](#), [F.6.2](#), [F.4.4](#), [F.5.3](#), [F.7.2](#) and [F.7.4](#).

F. Calculation

1. Calculation of stresses in a uniformly stiffened cylinder or cone as a basis for the calculation of the collapse pressure

1.1 The geometrical situation is defined in [Fig. A.1](#) and a summary of the stresses is given in [Table A.1](#).

Designations in [Fig. A.1](#):

- R_m = mean radius of the cylindrical shell
- R = internal radius of the cylindrical shell
- s = nominal wall thickness of the cylindrical shell after deduction of corrosion allowance c
- h_w = web height of the frame
- s_w = web thickness of the frame
- b_f = flange width
- s_f = flange thickness
- L_f = frame spacing
- A_f = cross sectional area of the frame
- R_C = radius to the centre of gravity of the frame cross section
- R_f = inner radius to the flange of frame



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL

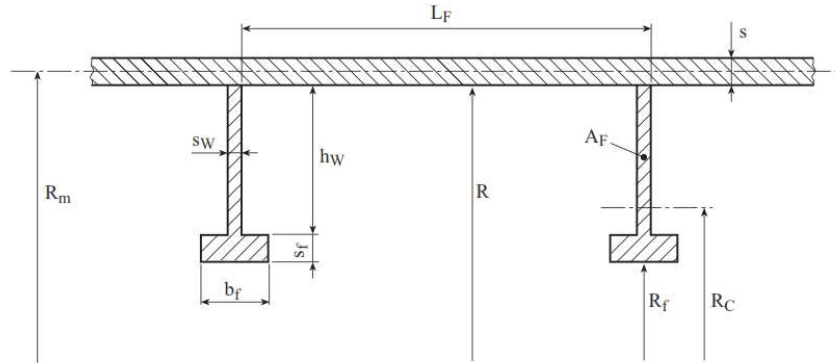


Fig. A.1 Geometrical situation of frames stiffening the pressure hull

Table A.1 Summary of stresses in a stiffened cylindrical shell

Stresses in the cylindrical shell						
Types of stresses	At the frame			In the middle of the field		
	Circumferential	Equivalent	Axial	Circumferential	Equivalent	Axial
Membrane stress	$\sigma_{\phi,F}^m$ (A19)		$\sigma_{x,F}^m$ (A17)	$\sigma_{\phi,M}^m$ (A18)		$\sigma_{x,M}^m$ (A17)
Membrane equivalent stress		$\sigma_{v,F}^m$ (A14)			$\sigma_{v,M}^m$ (A14)	
Bending stresses	$\sigma_{\phi,F}^b$ (A23)		$\sigma_{x,F}^b$ (A21)	$\sigma_{\phi,M}^b$ (A22)		$\sigma_{x,M}^b$ (A20)
Normal stress outside	$\sigma_{\phi,F}^m + \sigma_{\phi,F}^b$ (A19) + (A23)		$\sigma_{x,F}^m + \sigma_{x,F}^b$ (A17) + (A21)	$\sigma_{\phi,M}^m + \sigma_{\phi,M}^b$ (A18) + (A22)		$\sigma_{x,M}^m + \sigma_{x,M}^b$ (A17) + (A20)
Equivalent normal stress outside		$\sigma_{v,F,o}^{m+b}$ (A14)			$\sigma_{v,M,o}^{m+b}$ (A14)	
Normal stress inside	$\sigma_{\phi,F}^m - \sigma_{\phi,F}^b$ (A19) - (A23)		$\sigma_{x,F}^m - \sigma_{x,F}^b$ (A17) - (A21)	$\sigma_{\phi,M}^m - \sigma_{\phi,M}^b$ (A18) - (A22)		$\sigma_{x,M}^m - \sigma_{x,M}^b$ (A17) - (A20)
Equivalent normal stress inside		$\sigma_{v,F,i}^{m+b}$ (A14)			$\sigma_{v,M,i}^{m+b}$ (A14)	
Remark The numbers in brackets represent the numbers of the formulas to be applied.						

1.2 Calculation of factors and basic formulas

$$F_1 = \frac{4}{\theta} \left\{ \frac{\cosh^2 \eta_1 \theta - \cos^2 \eta_2 \theta}{\cosh \eta_1 \theta \cdot \sinh \eta_1 \theta + \cos \eta_2 \theta \cdot \sin \eta_2 \theta} \right\} \quad (A1)$$

$$F_2 = \frac{\frac{\cosh \eta_1 \theta \cdot \sin \eta_2 \theta}{\eta_2} + \frac{\sinh \eta_1 \theta \cdot \cos \eta_2 \theta}{\eta_1}}{\frac{\cosh \eta_1 \theta \cdot \sinh \eta_1 \theta}{\eta_1} + \frac{\cos \eta_2 \theta \cdot \sin \eta_2 \theta}{\eta_2}} \quad (A2)$$

$$F_3 = \sqrt{\frac{3}{1-\nu^2}} \left\{ \frac{\frac{\cosh \eta_1 \theta \cdot \sinh \eta_1 \theta}{\eta_1} + \frac{\cos \eta_2 \theta \cdot \sin \eta_2 \theta}{\eta_2}}{\cosh \eta_1 \theta \cdot \sinh \eta_1 \theta + \cos \eta_2 \theta \cdot \sin \eta_2 \theta} \right\} \quad (A3)$$

$$F_4 = \sqrt{\frac{3}{1-\nu^2}} \left\{ \frac{\frac{\cosh \eta_1 \theta \cdot \sin \eta_2 \theta}{\eta_2} - \frac{\sinh \eta_1 \theta \cdot \cos \eta_2 \theta}{\eta_1}}{\cosh \eta_1 \theta \cdot \sinh \eta_1 \theta + \cos \eta_2 \theta \cdot \sin \eta_2 \theta} \right\} \quad (A4)$$

$$p^* = \frac{2 \cdot E \cdot s^2}{R_m^2 \sqrt{3(1-\nu^2)}} \quad (A5)$$



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



E = modulus of elasticity
 = $2,06 \cdot 10^5$ N/mm² for ferritic steel
 = adequate values for other materials to be agreed

v = Poisson ratio in elastic range
 = 0,3 for steel

v_p = Poisson ratio in elastic-plastic range

$$\gamma = \frac{p}{p^*} \quad (A6)$$

p = calculation pressure
 = alternatively **NDP**, **TDP** and **CDP**

$$\eta_1 = \frac{1}{2} \sqrt{1-\gamma} \quad (A7)$$

$$\eta_2 = \frac{1}{2} \sqrt{1+\gamma} \quad (A8)$$

$$L = L_F - s_w \quad (A9)$$

$$L_{eff} = \frac{2}{\sqrt[4]{3(1-v^2)}} \sqrt{R_m \cdot s} \quad (A10)$$

$$A_{eff} = A_F \frac{R_m}{R_C} \quad (A11)$$

$$\theta = \frac{2 \cdot L}{L_{eff}} \quad (A12)$$

For the stress designations the following indices are valid:

- 0 – reference value
- m – membrane stress
- b – bending stress
- v – equivalent stress
- x – longitudinal direction
- φ – circumferential direction
- r – radial direction
- t – tangential direction
- o – outer side
- i – inner side
- F – at the frame
- D – at the web frame
- F/D – at the frame/ at the web frame
- M – in the middle of the field
- f – in the flange of the frame
- w – in the web of the frame
- C – at the centre of gravity of the frame cross section
- c – in the crown of the dished ends

The reference stress is the circumferential stress in the unstiffened cylindrical pressure hull:

$$\sigma_o = -\frac{p \cdot R_m}{s} \quad (A13)$$

The equivalent stresses are composed of the single stresses in longitudinal and circumferential direction:

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_\phi^2 - \sigma_x \cdot \sigma_\phi} \quad (A14)$$

The radial displacement in the middle between the frames w_M:

$$w_M = -\frac{p \cdot R_m^2}{E \cdot s} \left(1 - \frac{v}{2}\right) \left\{1 - \frac{A_{eff} \cdot F_2}{A_{eff} + s_w \cdot s + L \cdot s \cdot F_1}\right\} \quad (A15)$$

The radial displacement at the frames w_F:

$$w_F = -\frac{p \cdot R_m^2}{E \cdot s} \left(1 - \frac{v}{2}\right) \left\{1 - \frac{A_{eff} \cdot F_2}{A_{eff} + s_w \cdot s + L \cdot s \cdot F_1}\right\} \quad (A16)$$

$$\left[\cosh \eta_1 \theta \cdot \cos \eta_2 \theta + \frac{\sqrt{\frac{1-v^2}{3}} F_4 + \gamma}{4 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2} \sinh \eta_1 \theta \cdot \sin \eta_2 \theta \right]$$

Average membrane stress in longitudinal direction (independent of the longitudinal coordinate x):

$$\sigma_x^m = -\frac{p \cdot R_m}{2 \cdot s} \quad (A17)$$

Membrane stress in circumferential direction in the middle between the frames:

$$\sigma_{\phi,M}^m = E \frac{w_M}{R_m} + v \cdot \sigma_x^m \quad (A18)$$

and at the frames:

$$\sigma_{\phi,F}^m = E \frac{w_F}{R_m} + v \cdot \sigma_x^m \quad (A19)$$

Bending stresses in longitudinal direction in the middle between the frames:

$$\sigma_{x,M}^b = \pm \sigma_o \left(1 - \frac{v}{2}\right) F_4 \frac{A_{eff}}{A_{eff} + s_w \cdot s + L \cdot s \cdot F_1} \quad (A20)$$

and at the frames:

$$\sigma_{x,F}^b = \pm (\sigma_o - \sigma_{\phi,F}^m) F_3 \quad (A21)$$

The positive sign is valid for the outside of the cylindrical shell, the negative preceding sign for the inner side.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



Bending stresses in circumferential direction in the middle between the frames:

$$\sigma_{\phi,M}^b = \nu \cdot \sigma_{x,M}^b \quad (A22)$$

and at the frames:

$$\sigma_{\phi,F}^b = \nu \cdot \sigma_{x,F}^b \quad (A23)$$

The circumferential stress follows from the radial displacement to:

$$\sigma_{\phi,Fw}^m = E \frac{w_F}{R} \quad (A24)$$

in the frame foot,

respectively

$$\sigma_{\phi,Ff}^m = E \frac{w_F}{R_f} \quad (A25)$$

in the frame flange.

The equivalent stresses as well as the circumferential stresses in the frame summarized in Table A.1 are to be limited with the value of the permissible stresses $\sigma_{zul,NDP}$, $\sigma_{zul,TDP}$ resp. $\sigma_{zul,CDP}$ belonging to each load case according to GL Rules for [Manned Submersibles \(1-5-2\)](#), Section 5, D.3.

1.3 Calculation of the stresses for a conical pressure hull

The formulas given above are also applicable to stiffened conical shells.

The relevant formulas have to be modified using the half apex angle α . For this, the mean radius yields to:

$$R_{m,eqv} = R_m / \cos \alpha \quad (A26)$$

and the equivalent frame spacing turns to:

$$\begin{aligned} L_{F,eqv} &= L_F / \cos \alpha, \text{ resp.} \\ L_{eqv} &= L / \cos \alpha. \end{aligned} \quad (A27)$$

R_m = radius midway between the frames of the area under consideration

The calculation has to be carried out for both frames of the bay under evaluation. The dimensions of the frames have to be multiplied by the radius ratio $R_m/R_{m,F}$. For the following calculation of the collapse pressures the (absolutely) greatest value is decisive.

2. Calculation of the collapse pressure for the asymmetric interstiffener buckling of the shell in uniformly stiffened sections of the pressure hull

2.1 For conical pressure hulls the same values as defined for the stress calculation above are to be used.

For calculation of the minimum buckling pressure which depends on the number of circumferential lobes, the following approximation may be used:

2.2 Elastic buckling pressure

$$p_{cr}^{el} = \frac{2 \cdot \pi^2 \cdot E \cdot f}{3 \cdot \Phi \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{s}{R_m} \right)^2 \cdot \frac{R_m \cdot s}{L^2} \quad (A28)$$

Theoretical elastic-plastic pressure:

$$p_{cr}^i = p_{cr}^{el} \cdot \frac{1 - \nu^2}{1 - \nu_p^2} \cdot \left\{ \frac{E_t}{E} \cdot \left(1 - \frac{3\Phi}{4} \right) + \frac{E_s}{E} \cdot \frac{3\Phi}{4} \right\} \quad (A29)$$

with:

$$\Phi = 1,23 \frac{\sqrt{R_m \cdot s}}{L} \quad (A30)$$

$$f = \frac{\sigma_x^m}{\sigma_{\phi,M}^m} \quad (A31)$$

$$\sigma_v = \sqrt{\left(\sigma_{\phi,M}^m \right)^2 + \left(\sigma_x^m \right)^2 - \sigma_{\phi,M}^m \cdot \sigma_x^m} \quad (A32)$$

For secant module:

$$E_s = \frac{\sigma_v}{\varepsilon_v} \quad (A33)$$

For tangential module:

$$E_t = \frac{d\sigma_v}{d\varepsilon_v} \quad (A34)$$

For elastic-plastic Poisson's ratio:

$$\nu_p = 0,5 - (0,5 - \nu) \frac{E_s}{E} \quad (A35)$$

f , σ_v , E_s , E_t are functions of the elastic-plastic buckling pressure p_{cr}^i to be determined. For the iterative evaluation of p_{cr}^i the value f can be computed for the calculation pressure **CDP** and be assumed as constant in the following calculation. σ_v can be determined by linear extrapolation starting from the value of the calculation pressure **CDP**.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



2.3 Secant module and tangential module of steels

For various types of steel is valid:

$$z = \frac{\sigma_e}{\sigma_{0,2}} \quad (A36)$$

σ_e = limit of proportional extension

$\sigma_{0,2}$ = 0,2 % yield strength, R_{eH}

z = 0,8 for ferritic steel

= 0,6 for austenitic steel

If $\sigma_v > \sigma_e$ the formulas defined in 2.3.1 and 2.3.2 are valid.

For $\sigma_v \leq \sigma_e$ is valid:

$$E_s = E_t = E \quad (A37)$$

2.3.1 Modules for $z \geq 0,8$

$$E_t = E \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{\sigma_v - z \cdot \sigma_{0,2}}{(1-z) \cdot \sigma_{0,2}} \right)^2 \right\} \quad (A38)$$

$$E_s = E \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma_{0,2} \left(z + (1-z) \operatorname{arc} \tanh \frac{\sigma_v - z \cdot \sigma_{0,2}}{(1-z) \cdot \sigma_{0,2}} \right)} \quad (A39)$$

2.3.2 Modules for $z < 0,8$

$$E_t = E \cdot \left\{ 1 - k \left(\frac{\sigma_v - z \cdot \sigma_{0,2}}{(1-z) \cdot \sigma_{0,2}} \right) \right\} \quad (A40)$$

$$E_s = E \cdot \frac{\sigma_v}{z \cdot \sigma_{0,2} - \frac{1}{k} (1-z) \cdot \sigma_{0,2} \ln \left(1 - k \frac{\sigma_v - z \cdot \sigma_{0,2}}{(1-z) \cdot \sigma_{0,2}} \right)} \quad (A41)$$

k has to be calculated from the condition:

$$\sigma_{0,2} + 0,002 \cdot E = z \cdot \sigma_{0,2} - \frac{1}{k} (1-z) \cdot \sigma_{0,2} \cdot \ln(1-k) \quad (A42)$$

at least with the accuracy of two decimals.

2.4 Secant modules and tangent modules for other metallic materials

For other metallic materials z is to be agreed.

2.5 It has to be proven, that the collapse pressure, which is the theoretical elastic-plastic buckling pressure p_{cr}^i multiplied by the reduction factor r , is at least equal to the calculation pressure **CDP** of the pressure hull.

With the reduction factor:

$$r = 1 - 0,25 \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{p_{cr}^i}{p_{cr}^e} - 1 \right)} \quad (A43)$$

3. Calculation of the collapse pressure for the symmetric interstiffener buckling of the shell in uniformly stiffened sections of the pressure hull

3.1 For conical pressure hulls the equivalent values as defined for the stress calculation above have to be used.

3.2 Elastic buckling pressure:

$$p_{cr}^e = \frac{2}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \cdot E \cdot \frac{s^2}{R_m^2} \left\{ \left[\frac{2 \cdot L}{\pi \cdot L_{eff}} \right]^2 + \frac{1}{4} \left[\frac{\pi \cdot L_{eff}}{2 \cdot L} \right]^2 \right\} \quad (A44)$$

Theoretical elastic-plastic buckling pressure:

$$p_{cr}^i = \frac{2}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \cdot E_s \cdot \frac{s^2}{R_m^2} \cdot C \cdot \left\{ \left[\frac{\alpha \cdot L}{\pi} \right]^2 + \frac{1}{4} \left[\frac{\pi}{\alpha \cdot L} \right]^2 \right\} \quad (A45)$$

with:

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{3 \left(\frac{A_2 - \nu_p^2 \cdot A_{12}^2}{A_1} - \frac{A_{12}^2}{A_1^2} \right)}{R_m^2 \cdot s^2}} \quad (A46)$$

$$C = \sqrt{\frac{A_1 \cdot A_2 - \nu_p^2 \cdot A_{12}^2}{1 - \nu_p^2}} \quad (A47)$$

$$\nu_p = \frac{1}{2} - \frac{E_s}{E} \left(\frac{1}{2} - \nu \right) \quad (A48)$$

$$A_1 = 1 - \frac{1 - E_t/E_s}{4(1-\nu_p^2)K^2 \cdot H} \left[(2-\nu_p) - (1-2 \cdot \nu_p)k \right]^2 \quad (A49)$$

$$A_2 = 1 - \frac{1 - E_t/E_s}{4(1-\nu_p^2)K^2 \cdot H} \left[(1-2 \cdot \nu_p) - (2-\nu_p)k \right]^2 \quad (A50)$$

$$A_{12} = 1 + \frac{1 - E_t/E_s}{4 \nu_p (1-\nu_p^2)K^2 \cdot H} \left[(2-\nu_p) - (1-2 \cdot \nu_p)k \right] \cdot \left[(1-2 \cdot \nu_p) - (2-\nu_p)k \right] \quad (A51)$$

$$H = 1 + \frac{1 - E_t/E_s}{4(1-\nu_p^2)K^2} \left\{ \left[(2-\nu_p) - (1-2 \cdot \nu_p)k \right]^2 - 3(1-\nu_p^2) \right\} \quad (A52)$$

$$k = \frac{\sigma_{\phi, M}^m}{\sigma_x^m} \quad (A53)$$

$$K^2 = 1 - k + k^2 \quad (A54)$$

The procedure for the evaluation of the theoretical elastic-plastic buckling pressure is analogous to that described for asymmetric buckling.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



3.3 It has to be proven, that the collapse pressure, which is the theoretical elastic-plastic buckling pressure p_{cr}^i multiplied by the reduction factor r , is at least equal to the calculation pressure **CDP** of the pressure hull.

With the reduction factor:

$$r = 1 - 0,25 e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{p_{cr}^{el}}{p_{cr}^i} - 1 \right)} \quad (A55)$$

4. Proof of the collapse pressure for the general instability under consideration of the web frames

4.1 The proof of the general instability has to be done on the basis of a stress calculation which meets the equilibrium criteria in a deformed state. As pre-deformation, the out-of-roundness of the frames has to be considered. It has to be proven, that the out-of-roundness permissible according to **Annex B** can not lead to a global collapse.

4.2 Consideration of the stress-strain behaviour

For austenitic steels and other materials, for which $\sigma_{0,01} < 0,8 \cdot \sigma_{0,2}$ is valid, the actual stress-strain behaviour has to be considered by adequate calculation. The pressure hull, pre-deformed to the permissible out-of-roundness and inclinations of the frames, has to be incrementally pressure loaded. For the calculation of the increasing elastic displacement and stresses, the deformations in equilibrium condition and the actual, local material behaviour have to be considered.

For materials with $\sigma_{0,01} > 0,8 \cdot \sigma_{0,2}$ a linear elastic behaviour can be assumed for a stress calculation according to a theory of 2nd order. In this case the following stress limits (without consideration of local weaknesses) have to be met:

- The sum of basic stress and stress due to out-of-roundness in the frame flange shall not exceed $\sigma_{0,2}$.
- The sum of basic stress and stress due to out-of-roundness in the web frame flange shall not exceed 80 % of $\sigma_{0,2}$.

4.3 The calculation procedure is described in the following:

Definitions:

- p = collapse diving pressure of the pressure hull **CDP**
- $n \geq 2$ = number of circumferential lobes of out-of-roundness
- w_0 = maximum permissible out-of-roundness of the pressure hull according to **Annex B**
- R_m = mean radius of the pressure hull in the considered field

$R_{m,F/D}$ = mean radius of the pressure hull at particula frame or web frame

e = distance from the centroid of the frame o web frame plus the effective length of shell to the furthest surface of the flange (see **Fig A.2**). For conical shells $e' = e/\cos \alpha$ is valid.

R_C = radius to the centroid of the frame or wel frame cross section

L_D = length of the generating shell line at the considered area of the web frame

$L_{D,r}, L_{D,l}$ = length of the generating shell line of the left hand or the right hand adjacent field, depending on the field boundary for which the proof is made (see **Fig A.3**)

L_B = distance between bulkheads

$$\beta_D = \frac{\pi \cdot R_m}{L_D}; \quad \beta_B = \frac{\pi \cdot R_m}{L_B} \quad (A56) \quad (A57)$$

α = half apex angle (see **Fig. A.2**)

Generally the apex angle is not constant neither in the actual web frame field nor in the adjacent field. Which angle is decisive will be described in the following for each particular case.

I, I_D = area moment of inertia of frame respectively web frame including effective length of pressure hull shell, to be assumed always parallel to the axis of the pressure hull

The effective length is:

$$L_{eff} = \frac{2}{\sqrt[4]{3(1-\nu^2)}} \sqrt{R_{m,F} \cdot s / \cos \alpha} \quad (A58)$$

but not greater than the average value of both adjacent frame distances.

α_{Dl}, α_{Dr} = the local half apex angle at the adjacent web frame, right or left

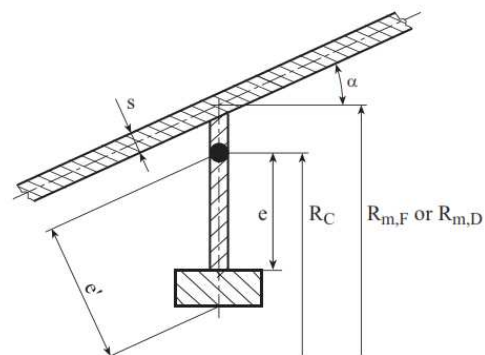


Fig. A.2 Situation at a frame or web frame

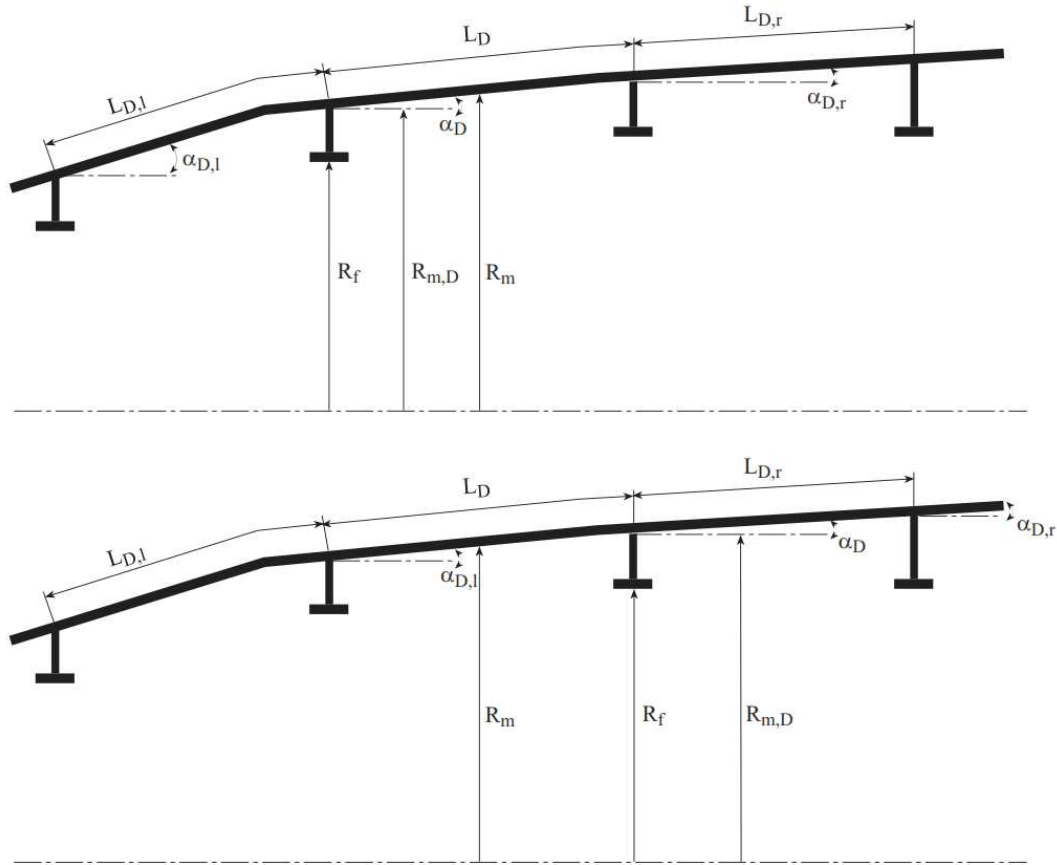


Fig. A.3 General stability - both calculation cases for a conical pressure hull

The area moment of inertia has to be converted to the radius R_m of the actual field by multiplying them by the ratio $(R_m/R_{m,F})^4$.

The proof has to be done for each section of the pressure hull, bounded by web frames, bulkheads or dished ends. Dished ends are to be considered as bulkheads.

A pressure hull section relevant for general instability may be limited by two web frames, followed by two adjacent web frame (or bulkhead) fields at each end, compare Fig. A.3. The calculation has to be performed for both relevant, adjacent fields in question. The most unfavourable case is decisive.

4.4 Basic stress in the frames and in the web frames

The basic stress in a frame flange has to be calculated according to 1.2, equation (A25) for $R = R_f$.

The effect of the half apex angle α is explicitly considered in the following formulas.

The basic stress in a deep frame can be conservatively evaluated according to the following formulas:

$$\sigma_{\phi,D} = - \frac{p \cdot R_m \cdot L_{eff} (1 - \nu/2) \frac{R_m}{R_f}}{A_D \frac{R_m}{R_D} + L_{eff} \cdot s} \frac{1}{\cos \alpha} \quad (A59)$$

R_f = radius of the flange

$$L_{eff} = \frac{2}{\sqrt[4]{3(1-\nu^2)}} \sqrt{R_m \cdot s / \cos \alpha} \quad (A60)$$

It has to be observed that A_D is the sole section area of the web frame and R_D the corresponding radius. For the thickness of the shell s the locally reinforced shell thickness at the web frame has to be used, if applicable.

The bending stress in the frame respectively web frame is:

$$\sigma_{\phi,D} = \pm w_{el} \cdot E \cdot e \frac{n^2 - 1}{R_C^2} \quad (A61)$$

R_C = see Fig. A.2



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



The elastic deflection w_{el} for the frames reads:

$$w_{el} = w_0 \frac{p}{p_g^n - p} \quad (A62)$$

and for web frames:

$$w_{el} = w_0 \frac{p}{p_g^n - p} \frac{p_m}{p_m + p_D} \quad (A63)$$

With the membrane part:

$$p_m = \frac{E \cdot s}{R_m} \cos^3 \alpha \frac{\beta^4}{(n^2 - 1 + \beta^2 / 2) (n^2 + \beta^2)^2} \quad (A64)$$

α is the average half apex angle and s the average cylinder shell thickness in the considered field.

And with the web frame part p_D :

$$p_D = \frac{2(n^2 - 1)E \cdot I_D \cdot \cos^3 \alpha}{R_{C,D}^2 [R_m - 4(R_m - R_{C,D})] (L_D + L_{D,l/r})} \cdot \frac{n^2 - 1}{n^2 - 1 + \beta_B^2 / 2} \quad (A65)$$

α is the maximum half apex angle along the pressure hull section starting at the middle of the field under consideration and ending at the middle of the adjacent field:

$$\alpha_{\max} = \max(\alpha; \alpha_{Dl}) \text{ resp. } \alpha_{\max} = \max(\alpha; \alpha_{Dr})$$

see Fig. A.3

$R_{C,D}$ applies to web frames.

The total instability pressure p_g^n has to be evaluated as follows:

$$p_g^n = p_F + \frac{p_m \cdot p_D}{p_m + p_D} + p_B \quad (A66)$$

using p_m and p_D as described above, and the frame part p_F as well as the bulkhead part p_B as follows:

$$p_F = \frac{(n^2 - 1)E \cdot I_F \cos^4 \alpha}{R_{C,F}^3 \cdot L_F} \frac{n^2 - 1}{n^2 - 1 + \beta^2} \frac{1}{2} \frac{p_D}{p_D + p_m} \quad (A67)$$

$R_{C,F}$ applies to frames.

$$p_B = \frac{E \cdot s}{R_m} \cos^3 \alpha \frac{\beta_B^4}{(n^2 - 1 + \beta_B^2 / 2) (n^2 + \beta_B^2)^2} \quad (A68)$$

α is here to be understood as the average half apex angle in the field considered.

The frame part has to be calculated with the dimensions of an equivalent frame including equivalent frame spacing. Generally these are the dimensions of the frame closest to the midway point of the field under evaluation, which have to be converted to the average field radius in a manner described in 1.3.

The following condition has to be met:

For each frame of the considered field the permissible out-of-roundness has to be calculated for $n = 5$, assuming for p_g^5 an infinitive field length ($\beta_D = 0$). The arithmetic average of the out-of-roundness values evaluated in this way for three adjacent frames divided by the related frame radius shall not be less than the out-of-roundness for the equivalent frame evaluated in analogous way.

5. Proof of the collapse pressure for tripping of frames

5.1 Stability against tripping

The proof of the tripping stability has to be done for frames and web frames on the basis of a stress calculation, which fulfils the status of equilibrium in deformed condition. As pre-deformations the tolerances of the frames as defined in Annex B may be considered.

Concerning the consideration of the stress-strain behaviour the rules defined in 4.2 are valid.

For materials with $\sigma_{0,01} \geq 0,8 \cdot \sigma_{0,2}$ linear elastic behaviour can be assumed for a stress calculation according to 2nd order theory. The following stress limits have to be observed (disregarding local material weakening):

- The equivalent stress in frame web shall not exceed $\sigma_{0,2}$.
- The circumferential stress in frame flange shall not exceed $\sigma_{0,2}$.

The effects to be considered in this procedure are defined further on.

5.2 Additional stresses caused by frame imperfections

The additional stresses caused by imperfections of the frame cross section have to be evaluated for internal frames according to the following formulas. See also Figure A.4.

The imperfections "inclination of web to plane of frame Θ ", "eccentricity of flange to web u_{ex} " and "misalignment of frame heel to frame plane d" are defined in Annex B, C.2.5 to C.2.7.

$$h'_w = h_w + \frac{s_f}{2} \quad (A69)$$



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



$$\beta = \frac{h'_w}{R} \quad (A70a)$$

$$R'_f = R_f + \frac{s_f}{2} \quad (A70b)$$

$$\beta_f = \frac{h'_w}{R'_f} \quad (A71)$$

$$A'_f = b_f s_f - \frac{s_f \cdot s_w}{2} \quad (A72)$$

$$I_f = \frac{b_f^3 \cdot s_f}{12} \quad (A73)$$

$$J_f = \frac{b_f \cdot s_f^3}{6(1+\nu)} \quad (A74)$$

$$A'_w = h'_w \cdot s_w \quad (A75)$$

$$D = \frac{E \cdot s_w^3}{12(1-\nu^2)} \quad (A76)$$

$$L_0 = \frac{\sigma_0 \cdot A_F}{R} \quad (A77)$$

$$F_f = \sigma_0 \cdot A'_f \quad (A78)$$

σ_0 = basic stress in flange according to 5.3 / 5.4.

$$\lambda = \frac{A'_w}{A_F} \quad (A79)$$

n = number of circumferential lobes of imperfections; the calculation has to be performed for $n = 3$.

$$e = \frac{h_w'^2 \cdot L_0}{D} - 2 \cdot n^2 \cdot \beta^2 \quad (A80)$$

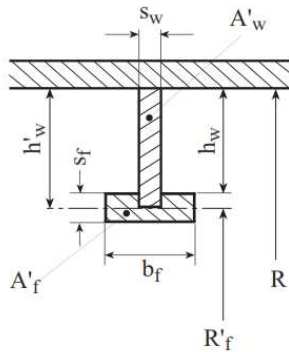


Fig. A.4 Local situation at the frame

$$\varepsilon = \lambda \frac{h_w'^2 \cdot L_0}{D} \quad (A81)$$

$$g = n^2 \cdot \beta \left(\lambda \frac{h_w'^2 \cdot L_0}{D} - n^2 \cdot \beta^3 \right) \quad (A82)$$

$$k_{11} = 12 - 1,2 \cdot e + 0,6 \cdot \varepsilon - \frac{13}{35} g \quad (A83)$$

$$k_{12} = 6 - 0,1 \cdot e - \frac{11}{210} g + \nu \cdot n^2 \cdot \beta^2 \quad (A84)$$

$$k_{22} = 4 - \frac{2}{15} e + 0,1 \cdot \varepsilon - \frac{g}{105} \quad (A85)$$

$$k_{31} = 6 - 0,1 \cdot e + 0,1 \cdot \varepsilon + \frac{13}{420} g \quad (A86)$$

$$k_{32} = 2 + \frac{e}{30} - \frac{\varepsilon}{60} + \frac{g}{140} \quad (A87)$$

$$A_{11} = \frac{n^2 \cdot E}{R_f^4} \left(n^2 \cdot I_f + J_f \right) + \frac{D}{h_w^3} k_{11} - n^2 \frac{F_f}{R_f^2} \quad (A88)$$

$$A_{12} = \frac{n^2 \cdot E}{R_f^3} \left(I_f + J_f \right) - \frac{D}{h_w^2} k_{12} \quad (A89)$$

$$A_{22} = \frac{E}{R_f^2} \left(I_f + n^2 \cdot J_f \right) + \frac{D}{h_w} k_{22} \quad (A90)$$

Amplitudes of the elastic displacement u and twist ω of the connection web-flange:

$$u = \frac{1}{\text{Det}} (B_1 \cdot A_{22} - B_2 \cdot A_{12}) \quad (A91)$$

$$\omega = \frac{1}{\text{Det}} (B_2 \cdot A_{11} - B_1 \cdot A_{12}) \quad (A92)$$

with

$$\text{Det} = A_{11} \cdot A_{22} - A_{12}^2 \quad (A93)$$

$$B_1 = \theta \left[\frac{F_f}{R_f} \left(1 + n^2 \cdot \beta_f \right) - L_0 \cdot \lambda \cdot k_{1,\theta} \right] + u_{\text{ex}} \frac{F_f}{R_f \cdot h_w} \cdot n^2 \cdot \beta_f + d \frac{L_0 \cdot n^2 \cdot \beta_f}{h_w} \left[(1-\lambda) \frac{R}{R_f} - \lambda \cdot k_{1,d} \right] \quad (A94)$$

$$B_2 = -\theta \cdot L_0 \cdot \lambda \cdot h_w \cdot k_{2,\theta} + u_{\text{ex}} \frac{F_f}{R_f} - d \cdot L_0 \cdot \lambda \cdot n^2 \cdot \beta_f \cdot k_{2,d} \quad (A95)$$



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



where:

$$k_{1,\theta} = \frac{1}{2} \left(-1 - \frac{\varepsilon}{420} + 0,013 \cdot g + 0,015 \cdot e^2 - 0,025 \cdot e \cdot \varepsilon - 0,7 \cdot n^2 \cdot \beta \right) \quad (A96)$$

$$k_{1,d} = \frac{1}{2} \left(-1 - \frac{\varepsilon}{420} + 0,013 \cdot g + 0,015 \cdot e^2 - 0,025 \cdot e \cdot \varepsilon \right) \quad (A97)$$

$$k_{2,\theta} = \frac{1}{12} \left[1 + \frac{e}{60} - \frac{\varepsilon}{105} - \frac{g}{140} - 0,008 \cdot e^2 + 0,013 \cdot e \cdot \varepsilon + 0,6 \cdot n^2 \cdot \beta \left(1 + \frac{19 \cdot e}{1260} + \frac{25 \cdot \varepsilon}{336} \right) \right] \quad (A98)$$

$$k_{2,d} = \frac{1}{12} \left(1 + \frac{e}{60} - \frac{\varepsilon}{105} - \frac{g}{140} - 0,008 \cdot e^2 + 0,013 \cdot e \cdot \varepsilon \right) \quad (A99)$$

Stresses in the flange are as follows:

$$\sigma_{r,F/Df}^b = \pm \frac{E \cdot b_f}{2 \cdot R_f^2} (n^2 \cdot u + R_f \cdot \omega) \quad (A100)$$

Bending stress around radial axis, and

$$\tau_{t,F/Df} = \frac{n \cdot E \cdot s_f}{2(1+\nu)R_f^2} (u + R_f \cdot \omega) \quad (A101)$$

Torsion around the tangential axis, which is phase-shifted against $\sigma_{r,F/Df}^b$ by a quarter period.

The bending stress at the toe of the web is:

$$\sigma_{r,F/Dw}^b = \pm \frac{6}{s_w^2} \left[\frac{D}{h_w} (k_{31} \cdot u - k_{32} \cdot h_w' \cdot \omega) + \lambda L_0 (k_{3,\theta} \cdot h_w' \cdot \theta + k_{3,d} \cdot n^2 \cdot \beta \cdot d) \right] \quad (A102)$$

with

$$k_{3,\theta} = \frac{1}{12} \left(1 + \frac{e}{60} - \frac{\varepsilon}{140} + 0,4 \cdot n^2 \cdot \beta \cdot (1 + 0,019 \cdot e - 0,009 \cdot \varepsilon) \right) \quad (A103)$$

and

$$k_{3,d} = \frac{1}{12} \left(1 + \frac{e}{60} - \frac{\varepsilon}{140} \right) \quad (A104)$$

The stresses resulting from imperfections of the frames are to be checked for frames and web frames, using different procedures.

5.3 Frames

For the stress σ_0 always $\sigma_{0,2}$ of the frame material has to be used.

The bending rigidity of the flange has to be neglected, i.e. set to zero ($I_f = 0$).

The equivalent stress at the web toe has to be evaluated with the calculation pressure for both signs of the bending stress $\sigma_{r,Fw}^b$ according to formula (A102).

Circumferential stress:

$$\sigma_{\phi,F}^{m+b} = \sigma_{\phi,Fw}^m + \frac{e_2}{e_1} \cdot \sigma_{O/R} \pm \nu \cdot \sigma_{r,Fw}^b \quad (A105)$$

with $\sigma_{\phi,Fw}^m$ according to 1.2, equation (A24), compare Fig. A.5 and

$$\sigma_{O/R} = \sigma_{0,2} + \sigma_{\phi,Ff}^m \quad (A106)$$

with $\sigma_{\phi,Ff}^m$ according to 1.2, equation (A25)

Radial stress:

$$\sigma_r = -\frac{L_0}{s_w} \pm \sigma_{r,Fw}^b \quad (A107)$$

The equivalent stress:

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_{\phi}^2 + \sigma_r^2 - \sigma_{\phi} \cdot \sigma_r} \quad (A108)$$

shall not exceed $\sigma_{0,2}$.

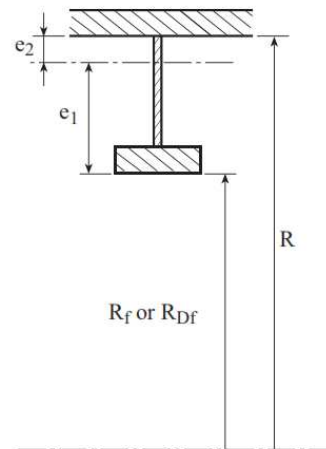


Fig. A.5 Situation of the frame in relation to the axis of the pressure hull



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



5.4 Web frames

For the basic stress in the flange σ_0 the absolute value of the circumferential stress $|\sigma_{\phi,D}|$ according to formula (A59) has to be taken, as obtained for the half value of the permissible out-of-roundness resulting from the general instability proof performed for $n = 2$ circumferential lobes according to 4.

It has to be proven that:

$$a) \quad \sigma_0 + |\sigma_{r,Df}^b| \leq \sigma_{0,2} \quad (A109)$$

$$b) \quad \sqrt{\sigma_0^2 + 3 \cdot \tau_{t,Df}^2} \leq \sigma_{0,2} \quad (A110)$$

with $\sigma_{r,Df}^b$ according to formula (A100) and $\tau_{t,Df}$ according to formula (A101) considering the relevant dimensions of the web frames

and the equivalent stress at the web toe

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_\phi^2 + \sigma_r^2 - \sigma_\phi \cdot \sigma_r} \leq \sigma_{0,2} \quad (A111)$$

The circumferential stress σ_ϕ is the sum of the basic stress $\sigma_{\phi,D}$ obtained with the formula (A59) in 4.4 and v -times the web bending stress $\sigma_{r,Dw}^b$ according to formula (A102):

$$\sigma_\phi = \sigma_{\phi,D} + v \cdot \sigma_{r,Dw}^b \quad (A112)$$

The radial stress is:

$$\sigma_r = \frac{-A_f \cdot \sigma_0 + A_w \cdot \sigma_D}{R_D \cdot s_w} \pm \sigma_{r,Dw}^b \quad (A113)$$

For calculation of σ_0 the following simplified formula can be used:

$$\sigma_0 = \frac{1}{2} |\sigma_{\phi,D}| + 0,4 \cdot \sigma_{0,2} \quad (A114)$$

5.5 Modifications for frames arranged outside

For frames arranged outside all radii (R , R_f , R_{Df}) have to be applied as negative values.

6. Spherical shells and dished ends

6.1 General

Spherical shells and dished ends are to be investigated for the load cases defined in GL Rules for [Manned Submersibles \(I-5-2\), Section 4, E.](#) respectively [Unmanned Submersibles \(ROV, AUV\) and Underwater Working Machines \(I-5-3\), Section 3, C.1.6.](#) against exceeding stresses and buckling. For dished ends the stresses in the crown and the knuckle are to be investigated. Spheres are to be treated like the crown area of dished ends.

6.2 Stresses

For the crown area the stress results from formula (A118). For the knuckle area the stress can be evaluated by formula (A119). The coefficients β are to be determined according to the GL Rules for [Machinery Installations \(I-1-2\), Section 7a, D.4.3.2.](#) They can also be evaluated directly with assistance of the following formulas:

For torispherical ends:

$$\beta = 0,6148 - 1,6589 \cdot x - 0,5206 \cdot x^2 - 0,0571 \cdot x^3 \quad (A115)$$

And for semi-ellipsoidal ends:

$$\beta = 1,3282 - 0,3637 \cdot x - 0,1293 \cdot x^2 - 0,0171 \cdot x^3 \quad (A116)$$

$$\text{with } x = \ln \left(\frac{s}{D_a} \right) \quad (A117)$$

for range of validity $0,001 \leq \frac{s}{D_a} \leq 0,1$

D_a = outside diameter of the dished end

In the range $0,5 \cdot \sqrt{s \cdot R}$ besides the transition to the cylinder the coefficient $\beta = 1,1$ for hemispherical ends.

Under the assumption that deviations in the form of dished ends stay within the permissible tolerances, the stresses can be calculated with the following formulas. If the tolerances are exceeded, a separate proof of stress is to be performed.

$$\sigma = - \frac{R_{c,o,l}^2 \cdot p}{2 \cdot R_{c,m,l} \cdot s} \quad (A118)$$

$R_{c,o,l}$ = local outside radius of sphere crown of the dished end

$R_{c,m,l}$ = local radius of the sphere crown of the dished end at half thickness of the shell

$$\sigma = - \frac{p \cdot D_a \cdot 1,2 \cdot \beta}{4 \cdot s} \quad (A119)$$

For p **NDP**, **TDP** and **CDP** are to be introduced respectively.

The proof has been made if the permissible stresses according to the Rules for [Manned Submersibles \(I-5-2\), Section 5, D.3.](#) are not exceeded.

6.3 Calculation of the collapse pressure

The calculations are based on the local thickness and curvature of the shell and they are considering an out-of-roundness of the shell in the sense of a local flattening up to maximum $u = 0,218 \cdot s_l / R_o$. This is valid for pressed spherical shells and is adequate to a local outside curvature radius of $R_{o,l} = 1,3 \cdot R_o$ of the outer nominal radius.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



The out-of-roundness and herewith the local radius is to be evaluated with a bridge gauge as described in [Annex B, E](#). There a measuring length $L_{cr,l}$ according to formula (A120) has to be used. The out-of-roundness defined in this way is to be understood as local flattening from the theoretical form of the sphere within the diameter $L_{cr,l}$. For the lay out a local radius of 1,3 times the nominal radius and a nominal thickness of the shell (eventually reduced by the corrosion addition) is to be assumed. The corrosion addition shall be considered by keeping the outside radius.

If other tolerances are provided or another out-of-roundness is resulting from the measurement checks according to [Annex B, E.3.](#) or [E.4.](#), then a recalculation of the permissible pressure according [Annex B, E.5.](#) is required.

For mechanically machined spherical shells local radii less than $1,05 \cdot R_o$ are reachable from point of manufacturing. The more favourable geometrical condition of the shell can be introduced in the calculation with at minimum $R_{o,l} = 1,05 \cdot R_o$ under the assumption that the measurement procedure, as described in [Annex B](#), has proven a maximum permissible local flattening of $u = 0,035 \cdot s_l / R_o$ with an accuracy of at least $0,001 \cdot s$.

6.4 Definitions

The following definitions are valid:

$R_{m,l}$ = maximum local mean radius of curvature of the sphere at shell half thickness

$R_{o,l}$ = maximum local outside radius of curvature of the sphere

s = nominal thickness of the shell

s_l = local average shell thickness

Critical arc length or diameter of the measuring circle to be used for measuring the deviations from the perfect form of the sphere according to [Annex B, E.3.](#) and [E.4.](#):

$$L_{cr,l} = \frac{2,2}{\sqrt[4]{\frac{3}{4} \cdot (1-v^2)}} \cdot \sqrt{R_{o,l} \cdot s_l} \quad (A120)$$

Elastic buckling pressure of the sphere:

$$p_{cr}^{el} = \frac{1,4}{\sqrt{3 \cdot (1-v^2)}} \cdot E \cdot \left(\frac{s_l}{R_{o,l}} \right)^2 \quad (A121)$$

Theoretical elastic-plastic buckling pressure of the sphere:

$$p_{cr}^i = p_{cr}^{el} \cdot \frac{\sqrt{E_t \cdot E_s}}{E} \quad (A122)$$

$$p_{0,2} = \frac{2 \cdot \sigma_{0,2} \cdot s_l \cdot R_{m,l}}{R_{o,l}^2} \quad (A123)$$

6.5 Spherical ends made of ferritic steel

For spherical ends made of ferritic steel grade GL-M550 or similar material p_{cr} can be calculated as follows:

6.5.1 For spherical ends which are not stress relieved the following is valid:

$$p_{cr} = p_{cr}^{el} \quad \text{if} \quad \frac{p_{cr}^{el}}{p_{0,2}} \leq 0,47 \quad (A124)$$

$$p_{cr} = p_{0,2} \left(0,38 + 0,195 \frac{p_{cr}^{el}}{p_{0,2}} \right) \quad (A125)$$

if $0,47 < \frac{p_{cr}^{el}}{p_{0,2}} \leq 3,18$

$$p_{cr} = p_{0,2} \quad \text{if} \quad \frac{p_{cr}^{el}}{p_{0,2}} > 3,18 \quad (A126)$$

6.5.2 For stress relieved spherical ends (tempered and stress relieved) the following is valid:

$$p_{cr} = p_{cr}^{el} \quad \text{if} \quad \frac{p_{cr}^{el}}{p_{0,2}} \leq 0,595 \quad (A127)$$

$$p_{cr} = p_{0,2} \left(0,475 + 0,195 \frac{p_{cr}^{el}}{p_{0,2}} \right) \quad (A128)$$

if $0,595 < \frac{p_{cr}^{el}}{p_{0,2}} \leq 2,7$

$$p_{cr} = p_{0,2} \quad \text{if} \quad \frac{p_{cr}^{el}}{p_{0,2}} > 2,7 \quad (A129)$$

The fabrication of ends by welding of stress relieved segments and the welding of the penetrations into the shell after stress relieving is permitted.

The calculated collapse pressure p_{cr} shall be at least equal to the collapse diving pressure **CDP** of the pressure hull.

6.6 Spherical shells of other materials

For spherical ends made of other steel materials the elastic-plastic buckling pressure p_{cr}^i which has been evaluated according to the formulas described above has to be multiplied by the reduction factor k defined in Fig. A.6. The reduction factor k is also summarized in tabular form in Table A.2. Intermediate values can be defined by linear interpolation.

For the application of non-iron metal materials the reduction factors are to be evaluated in accordance with GL by model tests.

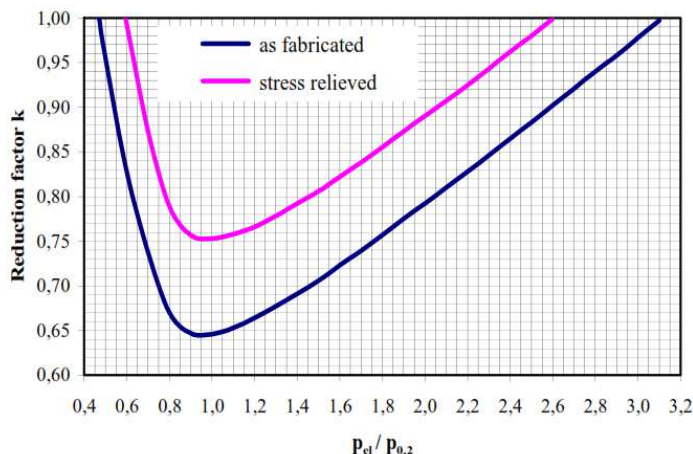


Fig. A.6 Reduction factor "k" for different kinds of steel treatment

Table A.2 Reduction factor "k" for different kinds of steel treatment

Pressure relation	Reduction factor k	
	As fabricated	Stress relieved
0,470	1,000	1,000
0,495	0,963	1,000
0,595	0,834	1,000
0,700	0,738	0,874
0,800	0,670	0,789
0,900	0,647	0,757
1,000	0,646	0,753
1,100	0,653	0,758
1,200	0,664	0,766
1,300	0,677	0,778
1,400	0,691	0,792
1,500	0,706	0,806
1,600	0,723	0,822
1,700	0,739	0,838
1,800	0,757	0,855
1,900	0,775	0,873
2,000	0,792	0,890
2,100	0,810	0,907
2,200	0,828	0,925
2,300	0,846	0,943
2,400	0,865	0,962
2,500	0,883	0,980
2,600	0,902	0,999
2,700	0,921	1,000
2,800	0,940	1,000
2,900	0,958	1,000
3,000	0,978	1,000
3,100	0,997	1,000
3,200	1,000	1,000

7. Penetrations of the pressure hull and discontinuities

7.1 Discontinuities

Discontinuities like

- connections of cylinders and conical segments
- transition rings (tripping rings)
- flanges for the attachment of dome shaped windows

are to be subjected for the load cases nominal diving pressure and test diving pressure to an analysis of the stress and elongation behaviour similar to [10]¹ and [11].¹ The equivalent stress follows from formula (A14). Sufficient safety is given, if the permissible stresses according to GL Rules for [Manned Submersibles \(I-5-2\), Section 5, D.3.](#) are not exceeded. If stiffeners are interrupted by penetrations, suitable reinforcements are to be provided.

7.2 Penetrations in the cylindrical or conical part of the pressure hull - area comparison principle

Penetrations in cylinders are to be preferably evaluated according to the GL Rules for [Machinery Installations \(I-1-2\), Section 7a, D. 2.3.4](#) with a design pressure p_c for which **NDP**, **TDP** resp. **CDP** are to be inserted alternatively. There is:

$$D_i = 2 \cdot R$$

and

s_A = necessary wall thickness at the penetration boundary according to GL Rules for [Machinery Installations \(I-1-2\), Section 7a, D.2.2](#) which is to be evaluated by iteration.

¹ See data about literature in G.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



The following rules for dimensioning are valid under the assumption that the material strength is the same for the shell of the pressure hull and for the reinforcement of the penetration boundary.

For different material characteristics the rules have to be modified in an analogous way.

7.3 Penetrations in the cylindrical or conical part of the pressure hull – cross sectional area substitution principle

After approval by GL the required reinforcement of the penetration boundary can be evaluated also with the cross sectional area substitution principle.

These rules for dimensioning are valid under the assumption that the material strength is the same for the shell of the pressure hull and for the reinforcement of the penetration boundary.

For different material strength the rules have to be modified in an analogous way.

7.3.1 Small penetrations which do not interrupt frames

7.3.1.1 Circular penetrations in radial direction

The situation is characterised by Fig. A.7 where for the calculation one half of the nozzle is considered.

Designations in Fig. A.7:

- s = thickness of the shell of the pressure hull after deduction of corrosion allowance
- s_v = thickness of the shell of the pressure hull in the reinforcement vicinity
- R = internal radius of the pressure hull
- d_a = external diameter of the nozzle
- ℓ_s, ℓ'_s = excess lengths of the nozzle
- $\ell_{\min} = \min(\ell_s, \ell'_s)$
= smaller excess length of the nozzle

$$\ell_{\max} = \max(\ell_s, \ell'_s)$$

= bigger excess length of the nozzle

s_s = wall thickness of nozzle

A = cross sectional area to be substituted

A_{eff} = effective substitutive cross sectional area

ℓ_{eff} = effective length of the nozzle

$$\ell^* = \frac{\sqrt{0,5(d_a - s_s) \cdot s_s}}{\sqrt[4]{3(1 - \nu^2)}} \quad (\text{A130})$$

$$r_m = 0,5 \cdot (d_a - s_s) \quad (\text{A131})$$

It has to be proven that the effective substitutive cross sectional area of the boundary reinforcement A_{eff} of the penetration is at least equal to the cross sectional area A cut out of the shell which is to be substituted.

The area to be substituted is

$$A = 0,5 \cdot d_a \cdot s \quad (\text{A132})$$

For penetrations, which are designed in the form shown in Fig. A.7 the effective substituted cross sectional area can be calculated according to the following formula:

$$A_{\text{eff}} = b_{\min} \cdot (s_v - s) + s_s \cdot \ell_{\text{eff}} \quad (\text{A133})$$

$$b_{\min} = 0,78 \cdot \sqrt{R \cdot s_v}$$

Effective length of the nozzle:

Case 1:

$$\ell_{\text{eff}} = 2 \cdot \ell^* + s_v \quad \text{for} \quad (\text{A134})$$

$$\ell_s \geq \ell^*; \ell'_s \geq \ell^* \quad (\text{A135})$$

Case 2:

$$\ell_{\text{eff}} = 2 \cdot \ell_{\min} + s_v \quad (\text{A136})$$

$$\frac{\ell^*}{2} \leq \ell_{\min} \leq \ell^* \quad (\text{A137})$$

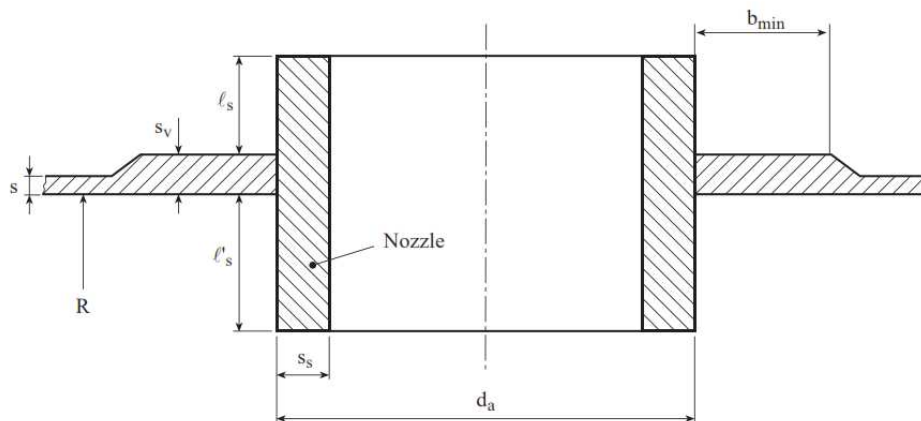


Fig. A.7 Penetration through the enforced shell

Case 3:

$$\ell_{\text{eff}} = \ell_{\text{min}} + \min\left(a, \frac{\ell^*}{2}\right) + s_v \quad (\text{A138})$$

$$\ell_{\text{min}} < \frac{\ell^*}{2}; \quad \ell_{\text{max}} > \frac{\ell^*}{2} \quad (\text{A139})$$

$$a = \ell_{\text{max}} \left(0,4 + 0,6 \frac{\ell_{\text{min}}^2}{\ell_{\text{max}}^2}\right) \quad (\text{A140})$$

7.3.1.2 Flush form of circular penetrations in radial direction

Penetrations in flush form of the pressure hull ($\ell_s = 0$), may have in the penetration area a cut out to include a zinc ring, see Fig. A.8.

In this case ℓ_{eff} can be evaluated with the formulas given above. In addition the strength of the cross section A-A has to be proven.

In the case that the wall of the pressure hull is not reinforced, the following condition has to be met:

$$c > \sqrt{4 \cdot \frac{s \cdot d_a \left(g - \frac{s}{2}\right) - c \cdot g^2}{d_a - c} + c_t^2} \quad (\text{A141})$$

$$c_t = \sqrt{3 \cdot \frac{s \cdot d_a - 2 \cdot c \cdot g}{d_a - c}} \quad (\text{A142})$$

7.3.1.3 Non-circular penetrations or penetrations not in radial direction to the shell

If the penetration is not circular or does not cut the shell of the pressure hull in radial direction the diameter d_a has to be replaced by:

$$d_a = \max\left(L_x, L_\phi \cdot \frac{\sigma_x^m}{\sigma_\phi^m}\right) \quad (\text{A143})$$

L_x = width of the penetration line in longitudinal direction

L_ϕ = width of the penetration line in circumferential direction

σ_x^m = membrane stress in the pressure hull in longitudinal direction

σ_ϕ^m = membrane stress in the pressure hull in circumferential direction

In special cases, if the Rules can only be utilized in limited way, the strength has to be proven by numerical computation.

7.3.2 Big penetrations interrupting frames

For preliminary dimensioning the following procedure is can be used:

The effective border reinforcement for the penetration has, in a similar way as for the small penetrations, to substitute the area cut out. The cross sections of the interrupted frame webs are to be considered additionally. The effective substitutive cross sectional area has to be evaluated in analogous way as for small penetrations. Compact reinforcement rings are fully load carrying if they are located directly in the penetration line.

The construction in the flange plane of the frame has to be designed in such a way that the maximal permissible forces in the flange ($A_f \cdot \sigma_{zul}$) can be transmitted further. For σ_{zul} the value of the permissible stress belonging to the individual load case acc. to GL Rules for [Manned Submersibles \(I-5-2\), Section 5, D.3.](#) is to be inserted.

Big penetrations have to be proven by numerical computation.

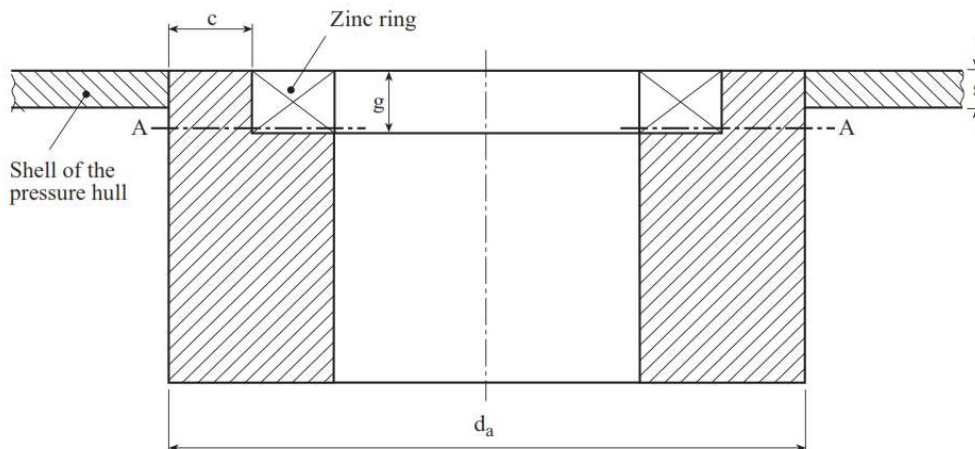


Fig. A.8 Penetration of flush form

7.4 Penetrations of spherical shells

Penetrations in spherical shells are to be evaluated according to the GL Rules for [Machinery Installations \(I-1-2\)](#), [Section 7a, D.4.3.3](#) with a design pressure p_c for which 1,2 **NDP**, 1,2 **TDP** resp. 1,2 **CDP** are to be inserted alternatively. There is:

$$D_i = 2 \cdot R$$

and

s_A = necessary wall thickness at the penetration boundary according to GL Rules for [Machinery Installations \(I-1-2\)](#), [Section 7a, D.2.2](#) which is to be evaluated by iteration.

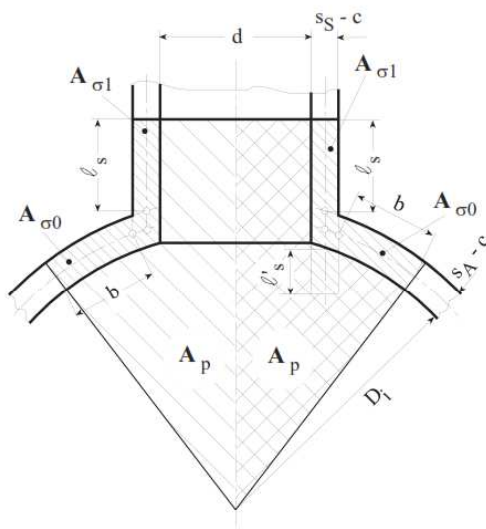


Fig. A.9 Penetrations of spherical shells

After approval by GL the cross sectional area substitution principle as described in [7.3](#) may be applied analogously. For this R is the internal radius of the sphere.

In cases, where area comparison respectively cross sectional area substitution principle are not fulfilled, a numerical proof has to be done. For this the local radius of the spherical shell according to [6.3](#) is to be chosen adequately in the vicinity of the penetration. The achieved failure pressure is then to be reduced like the elastic-plastic buckling pressure, which has been evaluated for undisturbed dished ends, see [Fig. A.6](#).

G. Literature

- [1] Germanischer Lloyd, Klassifikations- und Bauvorschriften, Teil 1 – Seeschiffe, Kapitel 2 – Maschinenanlagen
- [2] AD 2000 Regelwerk, Merkblätter Reihe B, Berechnung von Druckbehältern, Herausgeber: Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter
- [3] The Stress Analysis of Pressure Vessels and Pressure Vessel Compartments, Herausgeber: S.S. Gill, Pergamon Press, 1970
- [4] John C. Pulos und Vito L. Salerno: Axisymmetric Elastic Deformations and Stresses in a Ring-Stiffened, Perfectly Circular Cylindrical Shell under External Hydrostatic Pressure, DTMB-Report No. 1497
- [5] Development in Pressure Vessel Technology, Herausgeber: R. W. Nichols, Applied Science Publishers, 1983
- [6] European Recommendations for Steel Construction: Buckling of Shells, Herausgeber: ECCS-CECM-EKS, Brüssel, 1984
- [7] DIN 4114, Blatt 2: Stabilitätsfälle (Knickung, Kippung, Beulung), Ausgabe 2.53
- [8] Myron E. Lurchick: Plastic Axisymmetric Buckling of Ring-Stiffened Cylindrical Shells Fabricated from Strainhardening Materials and Subjected to External Hydrostatic Pressure, DTMB-Report No. 1393
- [9] Krencke, Martin A. und Kierman, Thomas J.: The Effect of Initial Imperfections on the Collapse Strength of Spherical Shells, DTMB-Report No. 1757
- [10] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 2
- [11] Raymond J. Roark and Warren C. Young: Formulas for Stress and Strain, McGraw-Hill Book Company
- [12] William F. Blumenberg: The Effect of Intermediate Heavy Frames on the Elastic General-Instability Strength of Ring-Stiffened Cylinders Under External Hydrostatic Pressure, DTMB-Report No. 1844
- [13] Thomas E. Reynolds: Inelastic Lobar Buckling of Cylindrical Shells Under External Hydrostatic Pressure, DTMB-Report No. 1392.

ANEXO II – ACRYLIC WINDOWS



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



Annex C

Acrylic Windows

A. General

1. Scope

In the sense of these Rules, acrylic windows are flat or curved windows for the view ports of pressure hulls which are made of cast, unlaminated polymethyl methacrylate plastic.

2. Limits of application

For acrylic windows following limits for application apply:

- designed service life 10 resp. 20 years (see explanatory notes below)
- temperature range -18°C to $+66^{\circ}\text{C}$
- rate of pressurization max. 10 bar/s
- pressure cycles at design pressure max. 10.000
- period under pressure at design pressure max. 40.000 h
- maximum allowable working pressure max. 1380 bar

The design service life for acrylic windows depends on numerous factors, in particular on the kind of loading. The maximum design service life to be assumed for spherical or cylindrical windows subjected to external overpressure, which are exclusively exposed to compressive stresses or minor bending stresses only, is generally 20 years, while for flat windows with flat seat it is 10 years. The design service life starts with the date of manufacturing regardless of the use in the submersible.

Depending on the previous actual loads acting on the windows and testing to be agreed with GL in detail, extension of the service life of acrylic windows may be approved.

3. Permissions/Approvals

For the design and manufacturing of acrylic windows the following permissions/approvals are required:

- approval of drawings and of the design for each type of window and each form of application by GL
- approval as material manufacturer by GL
- Manufacturer Inspection Certificate for the material, compare B.3.

- approval by GL as manufacturer of acrylic windows
- GL Certificate which certifies the manufacturing inspections and the pressure tests according to C.6.

B. Materials

1. Materials for acrylic windows are to be manufactured in accordance with a recognized standard (e.g. ANSI/ASME PVHO 1, Section 2). The producer is required to certify this before manufacture commences.

2. Acrylic windows have to meet the minimum physical requirements stated in Table C.1.

3. For each batch of acrylic plastic processed to windows the manufacturer has to issue a Manufacturer Inspection Certificate containing at least the following details:

- number and date of Certificate
- manufacturer's name and address
- designation and application of casting type
- batch number, quantity, shape and size of castings
- marking of castings
- results of tests applied in accordance with Table C.1
- stamp and signature

4. Where a Manufacturer Inspection Certificate of the kind required is not available for the acrylic plastic or where the conditions for recognition of the Inspection Certificate are not satisfied, the tests are to be extended in a manner to be agreed with GL in each individual case.

5. Each casting is to be provided at one point at least with a marking which identifies the type of casting, the batch number, the date of manufacture and the name of the manufacturer.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



C. Manufacture of Windows

1. The manufacture of acrylic windows covered by these Rules may only take place in specialized workshops which have been approved by GL for that purpose. Such approval can be granted only to those companies which employ properly trained specialists and which have available the necessary technical facilities enabling them to undertake the expert forming, machining, heat treatment and quality control of acrylic windows.

Application for approval is to be made to GL before the manufacture of windows commences.

2. The acrylic plastic to be used has to meet the requirements stated in B. After machining and any necessary forming operations, each window is to be subjected to heat treatment (tempering) in accordance with the acrylic plastic manufacturer's specification. After tempering no further mechanical polishing may be carried out on the window.

Flat disk windows for diving chambers where only the surrounding area is professionally machined need not to undergo a heat treatment after manufacturing.

3. Window surfaces are to be polished in such a way as to meet the optical clarity requirement stated in Table C.1.

4. For each window or series of windows the window manufacturer has to issue a component Certificate specifying all the stages of manufacture such as cutting, sticking, polishing, forming and tempering. In addition the tests carried out, the test results, the marking of the windows and the date of manufacture are to be indicated.

5. Each window is to be permanently marked with at least the following details:

- design pressure $PR = NDP$ [bar]
- design temperature [°C]
- GL approval stamp
- manufacturer's name or identifying mark
- serial number and year of manufacture.
- direction of pressure, if it is not clear

Wherever possible, the marking is to be engraved in the non-load-bearing portion of the window edge. The use of punches is not allowed.

6. Acrylic windows are to be presented to GL for an inspection of manufacture. In addition, each window is to be subjected, in the presence of a GL Surveyor, to a pressure test in accordance with GL Rules for Manned Submersibles (I-5-2), Section 2, F.3.3. At the pressure test the direction of pressure has to be observed. If the windows are subjected to pressure from both sides, this is to be considered for the testing.

D. Window Shapes and Sizes

1. The standard shapes and sizes shown in Table C.2, C.3 and C.4 are to be selected for the acrylic windows. For design pressure PR in general the nominal diving pressure NDP is to be used, see also the Rules for Manned Submersibles (I-5-2), Table 4.2 resp. Unmanned Submersibles (ROV, AUV) and Underwater Working Machines (I-5-3), Table 3.2.

2. Acrylic windows of other shapes and sizes or for other ranges of pressure may be used on application if approved by GL or if they are designed and manufactured to a standard recognized by GL.

Acrylic windows may be performed e.g. according to ASME PVHO-1, Section 2.

3. The design temperature to be assumed for acrylic windows shall be the mean value of the maximum external and internal temperatures to be expected under design pressure conditions.

4. Windows subjected to pressure from both sides are to be designed for the maximum pressure applied, regardless of whether this pressure is external or internal.

5. Pressure may only be applied to the convex side of spherical shell windows.

6. The thickness of the window has to be everywhere equal to, or greater than, the minimum value determined by reference to Tables C.2, C.3 and C.4. For intermediate temperatures linear interpolation may be applied.

7. With flat windows having right-angled edge and an O-ring seal, the outside diameter of the disk shall be within $+0,00/-0,25$ mm of the nominal value, or within $+0,00/-0,75$ mm where flat gasket seals are used.

8. Because of stress increasing effects grooves for seals shall not be located in the acrylic window bearing surface and also not in the window itself.

9. The greater diameter of the conical bearing surface of an acrylic window shall be within $+0,000/-0,002 D_o$ of the nominal value.

The included conical angle of the window shall be within $+0,25/-0,00$ degrees of the nominal value.

10. The concave or convex surface of the window shall not differ from an ideal spherical sector by more than $\pm 0,5$ % of the nominal external spherical radius.

11. The surface roughness R_a of the window bearing surface shall be $0,75 \mu\text{m}$ or better.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



E. Installation of Windows

1. If the window seat is not made of corrosion resistant material, it is to be sufficiently preserved with a suitable agent. In addition window and window seat are to be carefully cleaned using only cleaning material which is compatible with acrylic glass.

2. Conical window seats are to be treated with silicone or a suitable grease before the installation.

3. During installation of the window care is to be taken that the bolts of the fastening ring are to be tightened with the prescribed and all the same torque.

Table C.1 Mechanical and optical properties of acrylic plastics

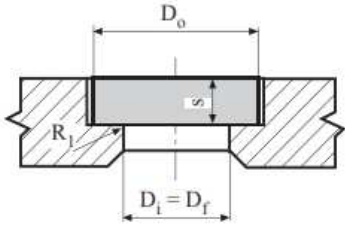
Properties	Specified values	Test method	ASTM
Ultimate tensile strength	$\geq 62 \text{ N/mm}^2$	DIN 53 455 ¹ specimen type 3	D 638 ¹
Elongation at break (in relation to necking zone)	$\geq 2 \%$	test velocity II standard climate 23/50	
Modulus of elasticity measured by tensile test	$\geq 2760 \text{ N/mm}^2$	DIN 53 457	
Compressive yield strength	$\geq 103 \text{ N/mm}^2$	DIN 53 454 ¹ standard climate 23/50	D 695 ¹
Modulus of elasticity measured by compression test	$\geq 2760 \text{ N/mm}^2$	size of test specimen: 25 × 12,5 × 12,5 mm DIN 53457 ¹	
Compressive deformation	$\leq 1 \%$	Constant compressive stress ¹ of 27,5 N/mm ² for 24 h at 50 °C test cube: 12,5 mm edge length	D 621 ¹
Ultraviolet transmittance	$\leq 5 \%$	UV-spectrophotometer wave length range: 290 - 370 nm thickness of specimen: 12,5 mm	E 308
Visual clarity	Legibility	A 25 x 25 mm standard type set comprising 7 lines of 16 letters each is to be clearly legible through the acrylic plastic pane at a distance of 500 mm.	D 702
Residual monomers methyl methacrylate ethyl acrylate	$\leq 1,6 \%$	Gas chromatograph	
¹ The mechanical properties are to be verified on at least 2 specimens.			



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



Table C.2 Standard dimensions for flat disk windows

<p>Range of application:</p> <p>Minimum wall thickness : $s \geq 12,5 \text{ mm}$</p> <p>Slenderness ratio : $s/D_o \geq 0,125$</p> <p>Edge radius : $1 \text{ mm} \leq R_1 \leq 2 \text{ mm}$</p> <p>Window seating : $1,25 \leq D_o/D_f \leq 1,5 \text{ mm}$</p> <p>Max. allowable working pressure : $p \leq 170 \text{ bar}$</p>					
					
Design pressure PR [bar]	Minimum wall thickness / inside diameter of seat s/D_i at				
	10 °C	24 °C	38 °C	52 °C	66 °C
5	0,134	0,146	0,154	0,164	0,188
10	0,154	0,173	0,188	0,201	0,226
15	0,173	0,195	0,210	0,223	0,253
20	0,188	0,210	0,226	0,240	0,281
25	0,201	0,223	0,240	0,257	0,305
30	0,210	0,233	0,253	0,274	0,324
35	0,219	0,243	0,267	0,292	0,344
40	0,226	0,253	0,281	0,305	0,363
45	0,233	0,264	0,295	0,317	0,383
50	0,240	0,274	0,305	0,329	0,402
60	0,253	0,295	0,324	0,354	0,441
70	0,267	0,310	0,344	0,378	0,480
80	0,281	0,324	0,363	0,402	0,520
90	0,295	0,339	0,383	0,427	0,559
100	0,305	0,354	0,402	0,451	0,598
110	0,315	0,368	0,422	0,476	0,637
120	0,324	0,383	0,441	0,500	0,676
130	0,334	0,398	0,461	0,524	0,715
140	0,344	0,412	0,480	0,549	0,754
150	0,354	0,427	0,500	0,573	0,793
160	0,363	0,441	0,520	0,598	0,832
170	0,373	0,456	0,539	0,622	0,871



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



Table C.3 Standard dimensions for spherical shell windows with conical seat (opening angle 60° / 90°)

Range of application:

Opening angle : $\alpha \geq 60^\circ$

Minimum wall thickness : $s \geq 12,5 \text{ mm}$

Minimum values for s/R_i :

α	$60^\circ \leq \alpha < 90^\circ$	$90^\circ \leq \alpha < 120^\circ$
s/R_i	0,09	0,06

Window seating : $D_i/D_f \geq 1,02$

Max. allowable working pressure : $p \leq 170 \text{ bar}$

Design pressure PR [bar]	Minimum wall thickness / inside diameter of seat s/D_i for $60^\circ \leq \alpha < 90^\circ$ at					Design pressure PR [bar]	Minimum wall thickness / inside diameter of seat s/D_i for $90^\circ \leq \alpha < 120^\circ$ at				
	10 °C	24 °C	38 °C	52 °C	66 °C		10 °C	24 °C	38 °C	52 °C	66 °C
5	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090	5	0,042	0,042	0,042	0,042	0,049
10	0,090	0,090	0,090	0,090	0,112	10	0,042	0,043	0,049	0,054	0,070
15	0,090	0,090	0,097	0,108	0,140	15	0,043	0,052	0,060	0,067	0,089
20	0,090	0,097	0,112	0,126	0,166	20	0,049	0,060	0,070	0,080	0,107
25	0,090	0,108	0,126	0,143	0,191	25	0,054	0,067	0,080	0,091	0,124
30	0,097	0,119	0,140	0,160	0,215	30	0,060	0,075	0,089	0,102	0,142
35	0,104	0,129	0,153	0,176	0,238	35	0,065	0,082	0,098	0,113	0,160
40	0,112	0,140	0,166	0,191	0,259	40	0,070	0,089	0,107	0,124	0,177
45	0,119	0,150	0,179	0,206	0,279	45	0,075	0,095	0,116	0,135	0,194
50	0,126	0,160	0,191	0,221	0,298	50	0,080	0,102	0,124	0,146	0,210
60	0,140	0,179	0,215	0,248	0,332	60	0,089	0,116	0,142	0,168	0,242
70	0,153	0,197	0,238	0,274	0,363	70	0,098	0,128	0,160	0,190	0,272
80	0,166	0,215	0,259	0,298	0,391	80	0,107	0,142	0,177	0,210	0,300
90	0,179	0,232	0,279	0,320	0,416	90	0,116	0,155	0,194	0,230	0,327
100	0,191	0,248	0,298	0,340	0,439	100	0,124	0,168	0,210	0,250	0,351
110	0,203	0,264	0,315	0,359	0,460	110	0,133	0,181	0,226	0,269	0,373
120	0,215	0,279	0,332	0,377	0,480	120	0,142	0,194	0,242	0,287	0,393
130	0,227	0,293	0,348	0,394		130	0,151	0,206	0,257	0,304	0,411
140	0,238	0,307	0,363	0,410		140	0,160	0,218	0,272	0,320	
150	0,248	0,320	0,377	0,425		150	0,168	0,230	0,287	0,336	
160	0,259	0,332	0,391	0,439		160	0,177	0,242	0,300	0,351	
170	0,269	0,344	0,404	0,452		170	0,185	0,254	0,314	0,365	

ANEXO III – ESPECIFICACIÓN DE MATERIAL BASE



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



2008a SECTION II, PART A

SA-517/SA-517M

SPECIFICATION FOR PRESSURE VESSEL PLATES, ALLOY STEEL, HIGH-STRENGTH, QUENCHED AND TEMPERED



SA-517/SA-517M



(Identical with ASTM Specification A 517/A 517M-06.)

A08

1. Scope

1.1 This specification covers high-strength quenched and tempered alloy steel plates intended for use in fusion welded boilers and other pressure vessels.

1.2 This specification includes a number of grades as manufactured by different producers, but all having the same mechanical properties and general characteristics.

1.3 The maximum thickness of plates furnished under this specification shall be as follows:

Grade	Thickness
A, B	1.25 in. [32 mm]
H, S	2 in. [50 mm]
P	4 in. [100 mm]
F	2.50 in. [65 mm]
E, Q	6 in. [150 mm]

1.4 The values stated in either inch-pound units or SI units are to be regarded separately as standard. Within the text, the SI units are shown in brackets. The values stated in each system are not exact equivalents; therefore, each system is to be used independently of the other without combining values in any way.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

- A 20/A 20M Specification for General Requirements for Steel Plates for Pressure Vessels
- A 435/A 435M Specification for Straight-Beam Ultrasonic Examination of Steel Plates
- A 577/A 577M Specification for Ultrasonic Angle-Beam Examination of Steel Plates
- A 578/A 578M Specification for Straight-Beam Ultrasonic Examination of Plain and Clad Steel Plates for Special Applications

3. General Requirements and Ordering Information

3.1 Plates furnished to this material specification shall conform to Specification A 20/A 20M. These requirements outline the testing and retesting methods and procedures, permissible variations in dimensions, and mass, quality and repair of defects, marking, loading, etc.

3.2 Specification A 20/A 20M also establishes the rules for the ordering information which should be complied with when purchasing material to this specification.

3.3 In addition to the basic requirements of this specification, certain supplementary requirements are available when additional control, testing, or examination is required to meet end use requirements. These include:

- 3.3.1** Vacuum treatment,
- 3.3.2** Additional or special tension testing,
- 3.3.3** Impact testing, and
- 3.3.4** Nondestructive examination.

3.4 The purchaser is referred to the listed supplementary requirements in this specification and to the detailed requirements in Specification A 20/A 20M.

3.5 If the requirements of this specification are in conflict with the requirements of Specification A 20/A 20M, the requirements of this specification shall prevail.

4. Manufacture

4.1 *Steelmaking Practice* — The steel shall be killed and shall conform to the fine austenitic grain size requirement of Specification A 20/A 20M.

5. Heat Treatment

5.1 Except as allowed by section 5.2, the plates shall be heat treated by heating to not less than 1650°F [900°C],

963

Copyright ASME International
Provided by IHS under license with ASME
No reproduction or networking permitted without license from IHS

Not for Resale



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



SA-517/SA-517M

2008a SECTION II, PART A

quenching in water or oil and tempering at not less than 1150°F [620°C].

5.2 Plates ordered without the heat treatment specified in section 5.1 shall be stress relieved by the manufacturer, and subsequent heat treatment of the plates to conform to section 5.1 shall be the responsibility of the purchaser.

6. Chemical Requirements

6.1 The steel shall conform to the chemical requirements shown in Table 1 unless otherwise modified in accordance with Supplementary Requirement S17, Vacuum Carbon-Deoxidized Steel, in Specification A 20/A 20M for grades other than Grade A.

7. Mechanical Requirements

7.1 Tension Tests:

7.1.1 Requirements — The plates as represented by the tension-test specimens shall conform to the requirements given in Table 2.

7.1.2 Test Methods:

7.1.2.1 The yield strength may be determined by the 0.2% offset method or by the total extension under load of 0.5% method.

7.1.2.2 For plates $\frac{3}{4}$ in. [20 mm] and under in thickness, the test specimen shall be the $1\frac{1}{2}$ in. [40 mm] wide rectangular-test specimen.

7.1.2.3 For plates over $\frac{3}{4}$ in. [20 mm], either the full thickness rectangular-test specimen or the $\frac{1}{2}$ in. [12.5 mm] round-test specimen may be used.

7.1.2.4 When the $1\frac{1}{2}$ in. [40 mm] wide rectangular-test specimen is used, the elongation is measured in a 2 in. or [50 mm] gage length which includes the fracture.

7.2 Impact Properties Requirements:

7.2.1 Transverse Charpy V-notch impact test specimens shall have a lateral expansion opposite the notch of not less than 0.015 in. [0.38 mm].

7.2.2 The test temperature shall be agreed upon between the manufacturer and the purchaser, but shall not be higher than 32°F [0°C].

8. Keywords

8.1 alloy steel; boilers; high-strength; impact tested; plates; pressure vessels; quenched; tempered



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



2008a SECTION II, PART A

SA-517/SA-517M

TABLE 1
CHEMICAL REQUIREMENTS

Elements	Composition, %							
	Grade A	Grade B	Grade E	Grade F	Grade H	Grade P	Grade Q	Grade S
Carbon:								
Heat analysis	0.15–0.21	0.15–0.21	0.12–0.20	0.10–0.20	0.12–0.21	0.12–0.21	0.14–0.21	0.10–0.20
Product Analysis	0.13–0.23	0.13–0.23	0.10–0.22	0.08–0.22	0.10–0.23	0.10–0.23	0.12–0.23	0.10–0.22
Manganese:								
Heat analysis	0.80–1.10	0.70–1.00	0.40–0.70	0.60–1.00	0.95–1.30	0.45–0.70	0.95–1.30	1.10–1.50
Product analysis	0.74–1.20	0.64–1.10	0.35–0.78	0.55–1.10	0.87–1.41	0.40–0.78	0.87–1.41	1.02–1.62
Phosphorus, max ^A	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
Sulfur, max ^A	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
Silicon:								
Heat analysis	0.40–0.80	0.15–0.35	0.10–0.40	0.15–0.35	0.15–0.35	0.20–0.35	0.15–0.35	0.15–0.40
Product analysis	0.34–0.86	0.13–0.37	0.08–0.45	0.13–0.37	0.13–0.37	0.18–0.37	0.13–0.37	0.13–0.45
Nickel:								
Heat analysis	...	...	...	0.70–1.00	0.30–0.70	1.20–1.50	1.20–1.50	...
Product analysis	...	...	...	0.67–1.03	0.27–0.73	1.15–1.55	1.15–1.55	...
Chromium:								
Heat analysis	0.50–0.80	0.40–0.65	1.40–2.00	0.40–0.65	0.40–0.65	0.85–1.20	1.00–1.50	...
Product analysis	0.46–0.84	0.36–0.69	1.34–2.06	0.36–0.69	0.36–0.69	0.79–1.26	0.94–1.56	...
Molybdenum:								
Heat analysis	0.18–0.28	0.15–0.25	0.40–0.60	0.40–0.60	0.20–0.30	0.45–0.60	0.40–0.60	0.10–0.35
Product analysis	0.15–0.31	0.12–0.28	0.36–0.64	0.36–0.64	0.17–0.33	0.41–0.64	0.36–0.64	0.10–0.38
Boron	0.0025 max	0.0005–0.005	0.001–0.005	0.0005–0.006	0.0005 min	0.001–0.005	...	...
Vanadium:								
Heat analysis	...	0.03–0.08	^B	0.03–0.08	0.03–0.08	...	0.03–0.08	...
Product analysis	...	0.02–0.09	...	0.02–0.09	0.02–0.09	...	0.02–0.09	...
Titanium:								
Heat analysis	...	0.01–0.03	0.01–0.10	...	...	...	...	0.06
Product analysis	...	0.01–0.04	0.005–0.11	...	...	...	...	0.07
Zirconium:								
Heat analysis	0.05 ^C –0.15	...	...	...	...	...	...	...
Product analysis	0.04–0.16	...	...	...	...	...	...	...
Copper:								
Heat analysis	...	...	...	0.15–0.50	...	...	...	...
Product analysis	...	...	...	0.12–0.53	...	...	...	...
Columbium, max								
Heat analysis	...	...	...	...	...	...	...	0.06
Product analysis	...	...	...	...	...	...	...	0.07

^A Applied to both heat and product analyses.

^B May be substituted for part or all of titanium content on a one for one basis.

^C Zirconium may be replaced by cerium. When cerium is added, the cerium/sulfur ratio should be approximately 1.5 to 1, based on heat analysis.

TABLE 2
TENSILE REQUIREMENTS

	2.50 in. [65 mm] and Under	Over 2.50 to 6 in. [65 to 150 mm]
Tensile strength, ksi [MPa]	115–135 [795–930]	105–135 [725 to 930]
Yield strength, min, ksi [MPa]	100 [690]	90 [620]
Elongation in 2 in. [50 mm], min, % ^A	16	14
Reduction of area, min, %:		
Rectangular specimens	35	...
Round specimens	45	45

^A See Specification A 20/A 20M for elongation adjustment.



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



SA-517/SA-517M

2008a SECTION II, PART A

SUPPLEMENTARY REQUIREMENTS

Supplementary requirements shall not apply unless specified in the order.

A list of standardized supplementary requirements for use at the option of the purchaser are included in Specification A 20/A 20M. Several of those considered suitable for use with this specification are listed by title. Other tests may be performed by agreement between the supplier and the purchaser.

- | | |
|---|---|
| S1. Vacuum Treatment, | S8. Ultrasonic Examination in Accordance With Specifica-tion A 435/A 435M, |
| S2. Product Analysis, | S9. Magnetic Particle Examination, |
| S3. Simulated Post-Weld Heat Treatment of Mechanical Test Coupons, | S11. Ultrasonic Examination in Accordance With Specification A 577/A 577M, |
| S5. Charpy V-Notch Impact Test, | S12. Ultrasonic Examination in Accordance With Specification A 578/A 578M, and |
| S6. Drop Weight Test (for Material 0.625 in. [16 mm] and Over in Thickness), | S17. Vacuum Carbon-Deoxidized Steel. |
| S7. High-Temperature Tension Test, | |



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



A514

STRUCTURAL PLATE STEEL

Description

Specification covers a grade of steel for plates. It is an alloy steel grade, fully killed, fine grain (ASTM Number 5 or smaller). It is heat treated by quenching and tempering. The heat treating temperatures are reported on the test certificates. The specification permits 14 compositions, of which Mittal Steel USA - Plate produces Grades A, B, D, E, F, H, P and Q. The specification is approved for use by the Department of Defense. The pressure vessel version of this specification is A517.

Year Introduced

1964

Special Features

A quenched and tempered alloy grade with a high strength-to-weight ratio.

Normal Uses

Industrial applications where high strength, low weight and high impact values are required. Machinery, mining equipment and other demanding applications. The chemistries of the A514 grades are often used to produce abrasion resistant grades to minimum Brinell requirements. Welding information is also provided for them. For bridges, this grade is specified as A709 Grade 100 or 100W.

Impact Toughness

Impact toughness requirements are not included in the basic specification, but can be added as a supplementary requirement. Mittal Steel USA - Plate can furnish the Charpy values shown on this sheet at extra charge. Additional requirements such as deoxidation practice, modified chemistry, special rolling or heat treatment may be necessary to achieve the properties.

Special Notes

This grade is available with Integra® or Fineline® quality to achieve improved properties.

Grades A, E, P—Post weld heat treatment may degrade heat-affected zone strength and toughness. Pretesting of specific welding and post weld heat treating procedures is recommended to assure optimization of final property levels.

Grades B, F, H, Q—It is important to note this grade of steel may be susceptible to cracking in the heat-affected zone of welds during post weld heat treatment (stress relief). Therefore, Mittal Steel USA - Plate recommends careful consideration be given to this phenomenon by competent welding engineers before stress relieving is applied to weldments of this grade. Also, it is not recommended for service at temperatures lower than -50°F or higher than 800°F.

ASTM Color Code

Red

A514 STRUCTURAL PLATE STEEL

Standard Specification for High Yield Strength, Quenched and Tempered Alloy Steel Plate, Suitable for Welding

This specification permits varied chemistries called Grades A, B, C, E, F, H, J, K, M, P, Q, R, S and T. (Mittal Steel USA - Plate makes only ASTM A514 Grades A, B, E, F, H, P and Q.)

Welding Data

Suggested welding consumables for arc welding processes

Thickness (Inches)	Manual Shielded Metal-Arc Low Hydrogen	Submerged-Arc	Gas Metal-Arc	Flux Cored-Arc	Notes
Up to 2½ ind	E11015-x, E11016-x, E11018-x	F11xx-Exx-xx	ER110S-x	E11xTx-x	See Special Notes section for concerns about post-weld heat treatment.
Over 2½	E10015-x, E10016-x, E10018-x	F10xx-Exx-xx	ER100S-x	E10xTx-x	

Deposited weld metal shall have a minimum impact strength of 20 ft-lb (27.1J) at 0°F (-18°C) when Charpy V-Notch specimens are required.

Suggested minimum preheat and interpass temperatures for welding

Thickness (Inches)	Produced to A514 Tensile Properties	Produced to Minimum Brinell Hardness Requirements for Abrasion Resistant Applications
Up to ¾ ind	50°F	100°F
Over ¾ to 1½ ind	125°F	150°F
Over 1½ to 2½ ind	175°F	200°F
Over 2½	225°F	250°F

A preheat or interpass temperature above the minimum shown may be required for highly restrained welds—preheat or interpass temperatures should not exceed 400°F for thicknesses up to 1½ in. or 450°F for thicknesses over 1½ in.

WELDING CARBON EQUIVALENT —

$$C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

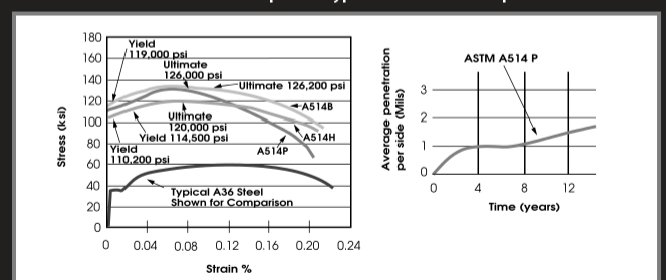
The carbon equivalent range shown in the table is based on heat analysis. It is the range most commonly produced for plates by Mittal Steel USA - Plate. Individual plates or heats may have carbon equivalents beyond the range in the table. See Chapter 10, page 38, regarding the significance of carbon equivalent.

Grade	Thickness (Inches)	Typical Carbon Equivalent Values
A	Up to 1¼	0.45 to 0.55
B	Up to 1¼	0.40 to 0.53
E	Up to 6	0.70 to 0.80
F	Up to 2¼	0.50 to 0.60
H	Up to 2	0.50 to 0.60
P	Up to 4	0.60 to 0.70
Q	Up to 6	0.75 to 0.85

Shaded area denotes availability of A514 plate with Charpy 15 ft-lb longitudinal impact toughness at various temperatures

Temp.	+70°F	+40°F	+10°F	0°F	-20°F	-30°F	-50°F
Thickness (Inches)							
Up to 6							

Stress vs. Strain Curve—Tensile Coupon Typical Industrial Atmospheric Corrosion Data



A representative stress vs. strain curve for a typical 8 in. gauge tensile coupon.

ANEXO IV – ESPECIFICACIÓN DEL APOORTE Y FUNDENTE



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



Alambre para SAW.

INDURA EM12K - H400

Clasificación AWS: F7A0-EM12K/F48A2-EM12K

- **Alambre de acero medio manganeso, recomendado para uniones a tope y filete, en aceros medio carbono y baja aleación**
- **Posición plana y horizontal filete**
- **Corriente continua, electrodo positivo**

Descripción

Pueden ser aplicados en múltiples pases en aceros que tengan un espesor menor que 25 mm (con fundente INDURA H-400).

La delgada capa de cobre en su superficie mejora el contacto eléctrico entre el alambre y la boquilla, mejorando la estabilidad del arco y aumentando la vida de la boquilla.

Usos

Ampliamente usado en aplicaciones que requieran buena ductilidad.

Aplicaciones típicas

- Construcción de vigas
- Puentes
- Carros de ferrocarril
- Estanques
- Rellenos en general
- Recipientes a presión de alta seguridad, etc.

Composición química (típica) del alambre:

C 0,09%; Mn 0,95%; Si 0,27%; P 0,013%; S 0,012%

Características típicas del metal depositado (con Fundente H-400) (según norma AWS: A5.17/A5.17M-97):

Resultados de pruebas de tracción
con probetas de metal de aporte

Energía Absorbida
Ch-v

Resistencia a la tracción : 640 MPa

48J a -18°C

Límite de fluencia : 572 MPa

Alargamiento en 50 mm : 23%

Amperajes recomendados:

Diámetro mm	Voltaje, volts	Amperaje		Velocidad cm/mín.
		mín.	máx.	
*2,0	25-28	200	300	10-30
2,4	26-30	250	350	20-40
3,2	27-32	300	450	30-50
4,0	28-32	400	650	30-70

* Electrodo fabricado a pedido



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



Varilla para GMAW y TIG.

TECHNICAL BULLETIN

MIDALLOY ER110S-1 WELDING WIRE

CLASSIFICATION

- AWS 5.28 Class ER110S-1 / ASME SFA 5.28 Class ER110S-1. Ref UNS K21015

DESCRIPTION

- MIDALLOY ER110S-1 is a low alloy, Copper-coated welding wire suited for MIG or TIG welding.
 - A#2 F#6

APPLICATIONS

- MIDALLOY ER110S-1 is used to weld HY80 and other similar steels with over 100 KSI tensile
- Welds exhibit high strength as well as low temperature toughness down to -60°F.

TYPICAL CHEMISTRY

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Ti	Zr	Al	Cu
0.08	1.6	0.45	0.005	0.005	2.2	0.2	0.3	0.03	0.01	.001	0.01	.15

TYPICAL AS WELDED MECHANICAL PROPERTIES

TENSILE STRENGTH	114,000 PSI
YIELD STRENGTH	98,000 PSI
ELONGATION IN 2"	16%
CHARPY V NOTCH @ -60°F	60 ft. lbs.

WELDING PARAMETERS (GMAW)

DIA.	SPRAY TRANSFER			SHORT ARC		
	AMPS.	VOLTS	GAS	AMPS.	VOLTS	GAS
.035"	160-200	28 - 32	98 Ar/2 O ₂	100-140	22 - 25	100% CO ₂
.045"	180-220	30 - 34	75 Ar/25 CO ₂	120-150	23 - 26	75 Ar/25 CO ₂

OTHER INFORMATION

- Mechanical properties are greatly influenced by preheat, interpass temperature, and post weld heat treatment.

STANDARD PACKAGING

- MIG 33 lb. Spool
- TIG 10 lb. Tubes / 60 lb. Carton

12/5/12

The contents of this publication are presented for informational purposes only, and while every effort has been made to ensure their accuracy, they are not to be construed as warranties or guarantees, express or implied, regarding the products or services described herein or their use or applicability. We reserve the right to modify or improve the designs or specifications of such products at any time without notice.

Office and Corporate Warehouse
630 Axminster Drive
St. Louis, MO 63026 • 636-349-6000 • 800-776-3300
Fax 636-349-2240




Midalloy



Diseño, cálculo y construcción del casco resistente de un sumergible independiente mediante el reglamento de clasificación del GL



Fundente.



Tecnología a su Servicio

Rev.01-010412

Clasificaciones:

AWS A5.17: F7A0-EM12K / F7A0-EL12

EN 760: S A AR 1 78 AC H10

EN 756: S 42 2 AR S2Si e S 42 0 AR S1

Características y Campos de usos:

- Fundente aglomerado para soldadura de arco sumergido, con adiciones de manganeso y silicio, los cuales dan como resultado alta productividad y bajo costo.
- Fundente de gran versatilidad para múltiples aplicaciones estructurales
- Excelente soldabilidad, fácil remoción de escoria, buena resistencia a la porosidad y a la fisuración con sobresaliente apariencia del cordón de soldadura.
- Recomendada para uniones a tope, filete, traslape y para soldaduras tipo canal con fácil remoción de escoria. Máximo espesor del cordón de soldadura 25 mm.
- Debido a su gran propiedad desoxidante, no requiere especial preparación del metal base ni limpieza antes de soldar.
- Aplicaciones típicas se encuentran en: cilindros de gas, ruedas de camiones, chapas estructurales, cañerías, unión de placas, piezas de diámetro pequeño, etc.

Análisis típico del metal depositado (% en peso)

Alambre	C	Mn	Si	P	S
EL-12	0.08	1.40	0.75	0.023	0.020
EM-12K	0.09	1.60	0.90	0.023	0.020

Propiedades mecánicas típicas del metal depositado


Alambre	Esf. Fluencia en 0.2%, MPa	Esf. Máx. de Tracción, MPa	Elongación (L=4d), %	E. Absorbida Ch-v
EL-12	470	570	33	30J a -18°C
EM-12K	570	645	30	50J a -18°C

Parámetros de Soldadura

Corriente de soldadura : Hasta 1000 Amp
Velocidad de soldadura : Hasta 180 cm/min.

Secado

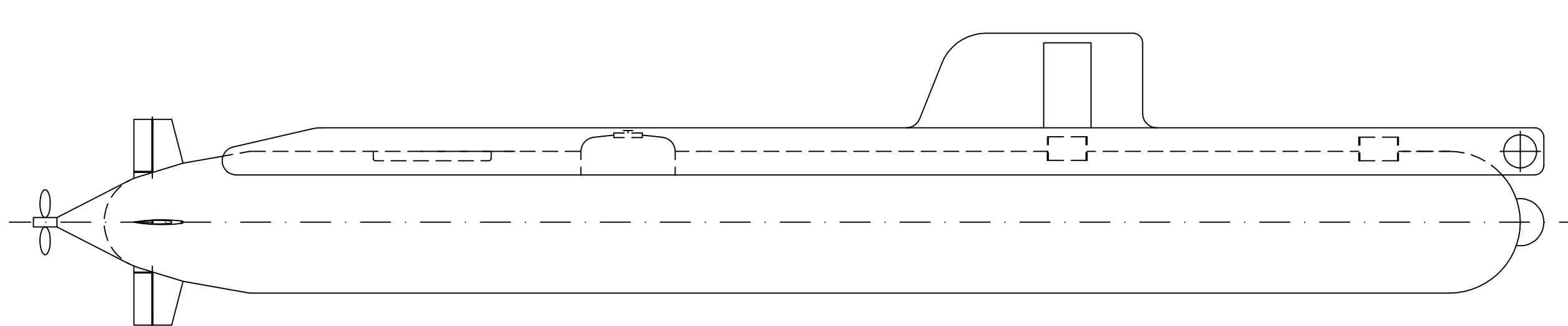
Para variadas aplicaciones, no es necesario secar el fundente
Nota: Los valores entregados son referenciales, cada aplicación posee parámetros característicos.

Posición de Soldadura

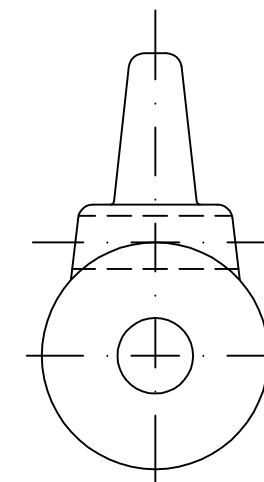
CCEP

Fundente INDURA 400

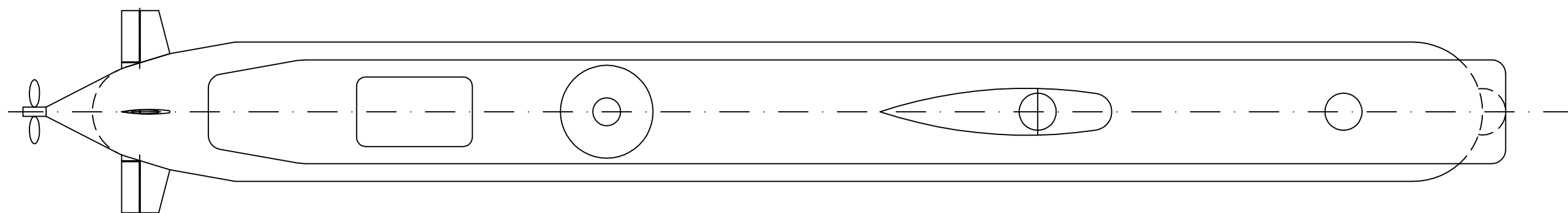
ANEXO V – PLANOS



ALZADO EXTERIOR



VISTA PROA

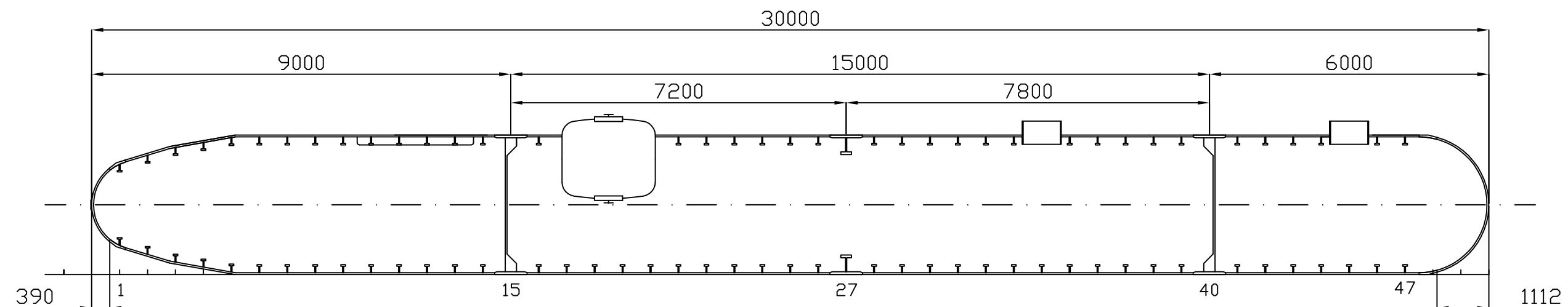


PLANTA EXTERIOR

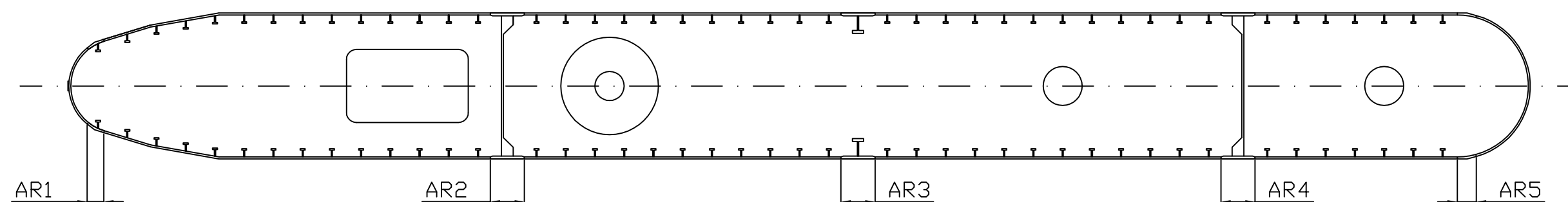
CARACTERISTICAS PRINCIPALES

ESLORA TOTAL	_____	31,50 m
MANGA TOTAL	_____	4,35 m
PUNTAL TOTAL	_____	5,50 m
ESLORA CASCO RESISTENTE	_____	30,00 m
DESPLAZAMIENTO SUPERFICIE	_____	200 t
DESPLAZAMIENTO INMERSION	_____	230 t
DIAMETRO CASCO RESISTENTE	_____	3,00 m
DOTACION	_____	3+5

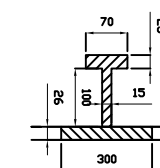
Escala: 1 / 100	PLANO DE FORMAS CASCO EXTERIOR	ETSINO
		Nombre: David G. Rubio
	Proyecto Final de Carrera	Fecha: 15/Julio/2013



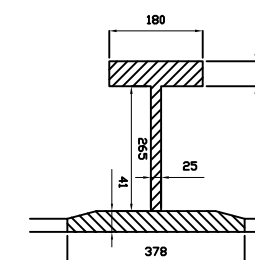
ALZADO



PLANTA



Cuaderna



Bularcama

SECCION ESFERICA POPA
(a 210 mm a Pp de la cuaderna 1)
R = 1000 mm
L = 390 mm
Angulo = 17 grados
Espesor = 26 mm

SECCION ESFERICA PROA
(a 688 mm a Pr de la cuaderna 47)
R = 3000 mm
L = 1112 mm
Angulo = 0 grados
Espesor = 30 mm

Escala: 1 / 100	CASCO RESISTENTE	ETSINO
		Nombre: David G. Rubio
	Proyecto Final de Carrera	Fecha: 17/Julio/2013

